第3章 緩衝材の連成解析モデルに関わる力学特性に関する試験

人工バリアの長期挙動の評価のための HMC 連成解析手法の構築にあたり、緩衝材に関する化 学的変質を考慮した力学特性及び水理特性を体系的に説明できるモデルを構築することを目的と した検討を実施する。平成 24 年度までに、ベントナイトのセメント影響によるモンモリロナイト の Ca 型化及び溶解の力学特性及び水理特性への影響に関する HMC 連成解析に資する知見を拡 充した。力学特性については、①Ca 型化による力学特性変化の取得、及び②モンモリロナイト含 有率の変化と力学特性変化の関係式の提示を行った。また、水理特性の取得としては、① Kozeny-Carman式を導入し、比表面積とCa型化率、モンモリロナイト含有率の関係式を提示し、 ②内間隙、外間隙の調和平均形式透水係数と既往の透水係数実測値で整合することを示した。

平成 25 年度からは、それまでに課題として挙げられた、ベントナイトの化学的変質により二次 鉱物が生成した場合の力学特性及び水理特性への影響について検討を開始した。加えて、化学変 質を伴う力学挙動の長期試験についても継続し、HMC連成解析に資するモデル化を行っている。

平成 26 年度は、主には、モンモリロナイトのアナルサイムへの変質影響に関する力学試験、及びせん断挙動に関する試験、加えて、長期性能評価のための化学・力学連成モデル試験の継続及び試験体の解体、分析による化学的挙動の確認、解析による検討を行った。

3.1 検討方法

本検討では、平成 20 年度~24 年度にかけて、上記試験計画に基づきベントナイトの力学モデ ルの妥当性確認のための試験、及び化学的な変質がベントナイトの力学挙動、物質移行(とくに 水理挙動)に及ぼす影響を考慮するための試験を実施した。ここで検討対象としている化学的な 変質とは、モンモリロナイトの Ca 型化と溶解・非膨潤性鉱物化である。

この研究の中では、力学材料としてのベントナイトをスメクタイト(モンモリロナイト)と非 膨潤性鉱物(石英)の混合材料として考え、モンモリロナイトのモデル化を検討した。これは、 これまでの地盤力学で研究対象としていた自然堆積粘土と図 3.1.1-1 に示すベントナイトの鉱物 組成を比較すると、著しい膨潤性や遮水性などのベントナイトの特徴とも言える力学挙動がモン モリロナイトに起因すると考えられるからである。

このモンモリロナイトのモデル化に当たっては、小林ら[1]に倣い、モンモリロナイトを力学 的には、「吸水膨潤するだけで土骨格構造を形成している 2 次粒子が崩壊し応力履歴を忘れる材 料」であるという概念で捉えている。同様に、水理的には、モンモリロナイトとは、「吸水する だけで土骨格構造を形成している 2 次粒子が膨潤するために比表面積が増大する材料」であると いう概念で捉えている(図 3.1.1-2 参照)。すなわち、ベントナイト系材料の化学的な変質を考 慮した力学モデルと水理モデルは、どちらも微視的には、吸水によるモンモリロナイトの 2 次粒 子の膨潤による崩壊(分散)が支配的であるという概念が骨子となっている。



図 3.1.1-1 クニゲル V1 の鉱物組成[2]



図 3.1.1・2 ベントナイトの膨潤による"応力履歴の亡失"と"比表面積の増大"のイメージ図

前研究フェーズでは、この考えに従って、Na型モンモリロナイトに非膨潤性鉱物としてケイ 砂を混入した人工ベントナイト、及びクニゲル V1の力学・水理特性を取得した。両者の比較に より、モンモリロナイト含有率がベントナイトの力学・水理特性(「吸水による応力履歴の亡失」 と「吸水による比表面積の増大」)に対して支配的であることを確認した。

今年度の研究では、モンモリロナイト含有率がベントナイトの力学・水理特性(「吸水による応 力履歴の亡失」と「吸水による比表面積の増大」)に支配的であるという前フェーズの結果を基本 として、図 3.1.1-3 に示すように、変質シナリオに応じて、モンモリロナイトと微粉砕ケイ砂に モンモリロナイトの溶解・沈殿によって生じる二次鉱物の割合、種類を変化させて混合させて、 多様な変質シナリオに対しても本研究成果が適用可能であることを確認する。図 3.1.1-3 には本 研究フェーズの全体計画のイメージを示す。別途実施している地球化学解析から想定されるモン モリロナイトの溶解・沈殿によって生じる二次鉱物の種類が本研究フェーズのパラメータであ る。



図 3.1.1-3 本研究フェーズの全体計画のイメージ

前フェーズで検討した変質シナリオは、モンモリロナイトが、モンモリロナイト(土粒子密度 2.75Mg/m³程度)と比較的土粒子密度の近い非膨潤性鉱物に変質した場合を取り上げて、この非 膨潤性鉱物として微粉砕ケイ砂(土粒子密度 2.65Mg/m³程度)で模擬した。これにより、変質によ るモンモリロナイト含有率の低下に伴う膨潤性能の変化を調べた。しかしながら、放射性廃棄物 処分場の緩衝材のような体積変化の余地がない境界条件下で土粒子密度が大きく変化する化学変 質が発生した場合、膨潤性能の変化だけでなく有効応力が大きく変化する可能性がある。そのた め、前フェーズでは考慮していない土粒子密度が大きく変化する化学変質を考慮することは重要 である。そこで今年度の変質シナリオは、昨年度と同様に、モンモリロナイトが低土粒子密度の 非膨潤性の鉱物に変質する場合を想定し、モンモリロナイトのアナルサイム化(土粒子密度 2.2Mg/m³程度)を考慮する。ただし、今年度は、アナルサイム化の割合を変化させることで、低 土粒子密度の非膨潤性の鉱物への変質のモデル化の精度を向上させる。

なお、本研究フェーズで検討対象とするベントナイトの化学的変質は、前述のモンモリロナイトの溶解による非膨潤性2次鉱物化(含有率の低下)と前フェーズと同様に、Ca型化である。この際、化学的変質は、水理/力学的変化に比べ平衡状態にあると考え、化学的変質を速度論的には取り扱わないものとする。

さらに、本研究フェーズから、ベントナイトの力学挙動評価においてせん断挙動に関する検討 も開始する。これまでの研究フェーズでは、図 3.1.1・4 に示すように圧密挙動と膨潤挙動を中心 に検討を行ってきた。これまでの研究フェーズで実施してきた力学試験は、モンモリロナイトの 圧密(圧縮・膨潤)変形のモデル化に資するものである。すなわち、図 3.1.1・4 に示すように、 モンモリロナイトの圧密変形は間隙比と圧密圧力の関係としてまとめられる。ここで、間隙比は 体積ひずみと一意の関係にあるので、この間隙比と圧密圧力の関係は、体積変化に関する応力ひ ずみ関係である。この間隙比と圧密圧力の関係で、完全飽和線は、正規圧密線に相当し、降伏後 の応力ひずみ関係である。また、圧密試験の除荷時の膨潤線は、弾性域の応力ひずみ関係であり、 この両者の差から塑性体積ひずみを取得することができる。この塑性体積ひずみは、地盤材料の 降伏曲面(弾性限界)の大きさを規定するパラメータ(硬化パラメータ)であり、この塑性体積 ひずみを実験によって取得することは、力学構成モデルの降伏曲面の大きさ、形状を規定するこ とを意味する。しかしながら、図 3.1.1-5 に示すように、自然堆積粘性土の力学モデルでは、粘 土の変形は、圧密変形とせん断変形の線形和で表されるとされており、ベントナイトの力学モデ ルを構築する場合でも、せん断挙動のモデル化が不可欠である。

図 3.1.1-5 には、力学モデル、および水理モデルの構築における本検討の位置付けも併せて示 す。本研究では、ベントナイト水理モデルを Kozeny-Carman 則に基づいて実施する。すなわち、 Kozeny-Carman 則に必要なベントナイトの比表面積は、ベントナイトの2層膨潤状態の含水比

(2層膨潤含水比)を密度と含水比をパラメータにした XRD から取得し、2層膨潤含水比と比 表面積の関係から透水係数を取得するという検討の流れを本研究でも踏襲する。ただし、今年度 の研究においては、前述のベントナイトがアナルサイム化した材料の透水係数に関する研究事例 がないことから、従来の透水試験方法による透水係数の取得を実施した。



図 3.1.1-4 力学試験のモデルへの反映イメージ



図 3.1.1-5 モデルの構築における本検討の位置付け

3.2 力学・物質移動特性変化に関する試験

3.2.1 使用材料

前フェーズで検討した変質シナリオは、モンモリロナイトが、モンモリロナイト(土粒子密度 2.75Mg/m³程度)と比較的土粒子密度の近い非膨潤性鉱物に変質した場合を取り上げて、この非膨 潤性鉱物として微粉砕ケイ砂(土粒子密度 2.65Mg/m³程度)で模擬した。これにより、変質による モンモリロナイト含有率の低下に伴う膨潤性能の変化を調べた。しかしながら、放射性廃棄物処 分場の緩衝材のような体積拘束条件下において土粒子密度が大きく変化する化学変質が発生した 場合、膨潤性能の変化だけでなく有効応力の大きな変化が発生する可能性があり、前フェーズで は考慮していない土粒子密度が大きく変化する化学変質を考慮することは重要である。そこで今 年度の変質シナリオとしては、モンモリロナイトが低土粒子密度の非膨潤性の鉱物に変質する場 合を想定し、モンモリロナイトのアナルサイム化(土粒子密度 2.2Mg/m³程度)を考慮する。

本検討で使用する材料は、以下の通りである。

(1) モンモリロナイト

本試験で使用するモンモリロナイトは、クニゲル V1 を精製したクニピア F を使用した。ただし、後述する一面せん断試験で使用するモンモリロナイトは、クニピア F とクニピア F をジェットミルで微粉砕したものを使用する。表 3.2.1-1 に前研究フェーズで取得したクニピア F の土粒子密度を示す。

表 3.2.1-1 クニピア F の土粒子密度

	試 料					クニピア F					
土	粒	子	\mathcal{O}	密	度	ρs	Mg/m ³	2.766 2.781 2.779			
平 均 值 ps Mg/m ³					2.776						

(2) ケイ砂

本試験で使用するケイ砂は、3 号ケイ砂(愛知県産三河砂)と5 号ケイ砂(オーストラリア 産のアルバニー砂)を1:1の乾燥質量割合で混合したものを使用した。さらに、ケイ砂を疑 似随伴鉱物として使用する場合は、上述のケイ砂をボールミルで微粉砕したもののうち、 75µmの篩を通過したものを使用する。これは、図 3.2.1-2に示したように、クニゲルV1の随 伴鉱物のほとんどの鉱物組成がSiO2であるためである。表 3.2.1-2に前研究フェーズで取得し たケイ砂の土粒子密度を示す。

表 3.2.1-2 ケイ砂の土粒子密度

試 料				粉砕ケイ砂			粉砕前ケイ砂						
土	粒	子	の	密	度	ρs	Mg/m ³	2.756	2.759	2.753	2.646	2.642	2.654
平 均 值 ps Mg/m ³		2.638			2.647								

(3) アナルサイム

本検討で使用するアナルサイムは、粗砕アナルサイム(カナダ・ケベック産、図 3.2.1-1 参 照)をメノウ乳鉢でエタノールを使用しながら湿式粉砕したもののうち、75µm の篩を通過し たものを使用した。図 3.2.1-2 に微粉砕アナルサイムの作製手順を示す。物理物性は後述す る。



図 3.2.1-1 カナダ・ケベック産アナルサイムのX線回折パターン



粗粒アナルサイムの粗粉砕(1mm 以下)



湿式微粉砕(エタノール添加)



アナルサイムの中粉砕(150µm 以下)



75µm 篩通し

図 3.2.1-2 微粉砕アナルサイムの作製手順

図 3.2.1-3 に粉砕後のアナルサイムの X 線回折パターンを示す。図には、昨年度使用したア ナルサイムの X 線回折パターンも併せて示す。図より、粉砕によるメノウなどの不純物の混入 がなく、昨年度とほぼ同様の鉱物組成であることが分かる。



図 3.2.1-3 粉砕後のアナルサイムの X 線回折パターン

(4) 変質前人工ベントナイト

本試験で使用する人工ベントナイトは変質前人工ベントナイトと変質後人工ベントナイトの 2 種類である。変質前人工ベントナイトは、特段の断りがない限り、モンモリロナイト、微粉 砕ケイ砂の混合土である。その混合割合は、前研究フェーズで実施した天然のベントナイト (クニゲル V1)のメチレンブルー吸着量試験から取得したモンモリロナイト含有率 59%と整 合するようにした。表 3.2.1-3 に前研究フェーズで取得した変質前人工ベントナイトの土粒子 密度を示す。

	試料番	変質前人工ベントナイト				
土 粒 子 の 密 度 ps Mg/m ³				2.761	2.769	2.760
平 均 值 ps Mg/m ³			Mg/m^3		2.763	

表 3.2.1-3 変質前人工ベントナイトの土粒子密度

(5) 変質後人工ベントナイト

本試験で使用する変質後人工ベントナイトは、特段の断りがない限り、モンモリロナイト、 微粉砕ケイ砂、微粉砕アナルサイムを混合したものである。表 3.2.1-4 には人工ベントナイト 系材料の鉱物組成の変質前後のイメージを示している。 変質前人工ベントナイトのモンモリロナイト含有率が 59%であったのに対して、平成 25 年 度に設定した変質後人工ベントナイトは、変質前のモンモリロナイトの半分がアナルサイムに 変質したとして、モンモリロナイト含有率29.5%、アナルサイム含有率が29.5%、微粉砕ケイ 砂が 41%となるように混合したものである。今年度は、変質が激しいケースとして、モンモ リロナイト含有率 20%、アナルサイム含有率が 39.5%、微粉砕ケイ砂が 41%の場合と、変質 が緩慢であるケースとして、モンモリロナイト含有率 40%、アナルサイム含有率が 19.5%、 微粉砕ケイ砂が 41%の場合の2 通りの変質後人工ベントナイトを使用した。各、変質後人工ベ ントナイトの物理物性は後述する。

表 3.2.1-4 人工ベントナイト系材料の鉱物組成の変質前後のイメージ

	wt%	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	備考
	変質前		モンモリロナイト : 59%						微粉砕ケイ砂:41%			
人工	変質後	29.5%				化:29	.5%		41	%	90 100 ⇒ : 41%	
ベントナイト		20	%		39	%			41	%		
		40%				19	%		41	%		

3.2.2 物理試験

(1) 土粒子密度試験

1) 概要

土粒子密度は、地盤材料の水理・力学試験を行う上で基本、かつ必須の物理量である。前 フェーズでは、表 3.2.2-1に示すように Na 型ベントナイト (クニゲル V1、MX80)、Ca 型 化ベントナイト (Ca 型化クニゲル V1)、Na 型モンモリロナイト (クニピア F、水簸した MX80 のモンモリロナイト、微粉砕ケイ砂)等について土粒子密度を求めてきた。

今年度も、H25年度と同様に、モンモリロナイトが溶解してアナルサイムに変質した場合 のモデル実験として、微粉砕アナルサイムを人工ベントナイトに混合した試料(変質後人工 ベントナイト)を試験に用いるため、この微粉砕アナルサイムと変質後人工ベントナイトの 土粒子密度を計測する。表 3.2.2・2に今年度の土粒子密度試験のケースを示す。土粒子密度試 験は、【JGS0111・2000:地盤工学会基準 土の粒度試験方法】に則り実施する。

表	$3.2.2 \cdot 1$	前フェーズの土粒子	密度試験一	覧
---	-----------------	-----------	-------	---

年度	材料
H20	Na 型モンモリロナイト
H21	Ca 型化モンモリロナイト
H22	ケイ砂含有 Na 型モンモリロナイト(人工ベントナイト) ケイ砂 微粉砕ケイ砂(アルミナ乳鉢) クニゲル V1(天然ベントナイト)
H23	 微粉砕ケイ砂(陶器ボールによるボールミル) MX80 クニゲル V1 随伴鉱物 MX80 随伴鉱物

表 3.2.2-2 土粒子密度試験ケース

材料	試験数	備考
アナルサイム	タッ同	【JGS0111-2000 : 地盤工学会基準
変質後人工ベントナイト	谷る凹	土の粒度試験方法】に準拠

試験結果

微粉砕アナルサイムと変質後人工ベントナイトの土粒子密度試験結果を表 3.2.2-3を示す。 試験は繰り返し回数 3 回で実施した。表から、今年度使用した微粉砕アナルサイムの土粒子 密度が 2.288Mg/m³であることが分かった。昨年度使用した微粉砕アナルサイムの土粒子密 度が 2.287Mg/m³であったため、両者は概ね同等と言える。モンモリロナイトの土粒子密度 が、表 3.2.1-3に示した前フェーズの結果から 2.763Mg/m³であることから、モンモリロナイ トが溶解し、アナルサイムとして沈殿すると、土粒子密度が大きく変化することが分かる。

また、このアナルサイムを含む変質後の人工ベントナイトの土粒子密度も、変質が大きい アナルサイム 39%の試料では 2.527Mg/m³であり、変質が小さいアナルサイム 19%のケース では 2.622Mg/m³となった。表 3.2.1-3に示した前フェーズの結果から変質前の人工ベントナ イトの土粒子密度が 2.763Mg/m³であることから、ベントナイト全体の平均的な土粒子密度 でも、そのモンモリロナイトがアナルサイムとして沈殿すると、土粒子密度が大きく変化す ることが分かる。この変化は、乾燥密度一定条件であればベントナイトの間隙を消費するこ とになり、力学的には有効応力の増加、水理学的には止水性の向上に寄与する可能性がある。 ただし、モンモリロナイトの現象に伴う膨潤圧の減少、比表面積の減少も同時に生じること が予想されるため、実際の力学・水理挙動は両者が相殺した結果として決定されるものと予 想される。

表 3.2.2-3	微粉砕アナルサイムと	変質後人上ペントナイトの 	主粒子密度試驗結果

試 料 番 号 (深さ)	微粉矿	やアナル	サイム	変質後人工ベントナイト		
ピクノメーター No.	201	202	203			
(試料+蒸留水+ピクノメーター) 質量 mb g	154.825	145.707	153.434			
m b をはかった時の内容物の温度 T ℃	23.1	23.1	23.1			
T ℃における蒸留水の密度 ρw(T) Mg/m ³	0.99751	0.99751	0.99749			
温度 T ℃の蒸留水を満たしたときの (蒸留水+ピクノメーター)質量 mag	149.524	140.530	148.542		X	
容 器 No.	201	202	203			
試 料 の (試料+容器)質量 g	127.800	131.039	155.447			
炉 乾 燥 質 量 容 器 質 量 g	118.376	121.889	115.447			
ms g	9.424	9.150	8.678			
土 粒 子 の 密 度 ps Mg/m ³	2.280	2.297	2.286			
		0.000		変質:大	2.527	
平 均 值 ps Mg/m ³		2.288		変質:小	2.622	
	()	乍年度 2.28	37)	(昨年度	2.556**)	

**所定の乾燥質量割合で混合された場合の計算値

レーザー回折式の粒度分布測定器を用いた粉砕後のアナルサイムの粒度分布を図 3.2.2-1 に示す。図には昨年度の結果も併せて示している。

アナルサイムは微粉砕した後にJGS0051の土質区分における細粒分の上限値である75µm の篩を通過させており、その粒径75µm の通過質量百分率は97%程度である。なお、粒径 75µm の通過質量百分率が100%とならないのは、レーザー回折式の粒度分布測定の際に作 製するアナルサイムの懸濁液が十分に分散しておらず、部分的に凝集しているためだと考え られる。

図から、両粒度分布は概ね一致しており、昨年度使用したアナルサイムと本年度使用した アナルサイムは概ね同等であると言える。



図 3.2.2-1 粉砕後のアナルサイムの粒度分布

3.2.3 力学試験

- (1) 排気一次元圧縮試験
 - 1) 試験概要

ベントナイトの力学モデルを構築する際に、圧密・膨潤特性は重要な要素である。そこで、 2 次鉱物が生成したことを模擬した試料を用いて、排気一次元圧縮試験を行う。ベントナイ ト系人工バリア材料の排気一次元圧縮試験を行えば、ベントナイト系人工バリアの正規圧密 線、等飽和度線、等含水比線などの力学特性、平衡膨潤圧と平衡膨潤量の関係などの膨潤特 性が得られるため、ベントナイト系人工バリア力学モデルの妥当性を検証し、変質に伴う力 学挙動の変化を考慮させるためには重要な試験である。

前研究フェーズでは、表 3.2.2-1に示すように、Na 型モンモリロナイト (クニピア F)、 Ca 型化モンモリロナイト、クニミネ工業製のクニピア F にケイ砂を混合させた人工ベント ナイトとクニゲル V1、MX80 などの一次元圧縮試験を行い、完全飽和線を取得した。この結 果、モンモリロナイト含有率の違いによって完全飽和線が平行移動すること、モンモリロナ イトの産地の違いにより、完全飽和線の傾きが異なることなどが明らかとなった。

今年度は、H25 年度と同様に、表 3.2.3-2に示すように変質後人工ベントナイトの完全飽 和線を取得する。ただし、H25 年度とはモンモリロナイトとアナルサイムの混合割合を変化 させ、低変質ケースと高変質ケースとしている。今年度の試験結果によって、モンモリロナ イトが低土粒子密度の非膨潤性の鉱物に変質する化学変質が完全飽和線に及ぼす影響を定量 評価できる。

年度	材料	液種	含水比
H20	クニピア	蒸留水	3
H21	Ca 型化モンモリロナイト	蒸留水	3
H22	ケイ砂含有 Na 型モンモリロナイト(人工ベントナイト) クニゲル V1(天然ベントナイト)	蒸留水	各3
H23	ケイ砂含有率 80%の Na 型モンモリロナイト (人工ベントナイト) MX80	蒸留水	2

表 3.2.3-1 前フェーズの一次元排気圧縮試験一覧

表 3.2.3-2 一次元排気圧縮試験ケース

変質後人工ベントナイト	液種	含水比(%) (飽和乾燥密度(Mg/m³))					
昨年度(M29.5、A29.5)	蒸留水	11.34 (1.982)	15.63 (1.826)	19.47 (1.707)	25.34 (1.551)	31.42 (1.418)	
低変質ケース(M40、A19.5)	蒸留水	18.28 (1.788)	25.56 (1.582)	33.91 (1.397)	—	_	
高変質ケース(M20、A39.5)	蒸留水	16.11 (1.808)	22.37 (1.624)	30.02 (1.445)	_	_	

試験手順は次の通りである。

- 前述の土粒子密度試験より土粒子密度が既知となった各試料を用いて初期含水比を パラメータとして調整した材料を作製する。
- 各試料を締固めモールドにセットし、静的に一定速度で一次元圧縮する。
- その際の載荷圧と湿潤密度を記録する。
- 湿潤密度と初期含水比から乾燥密度を算出し乾燥密度と静的締固め圧力の関係としてまとめる。

以上の手順を図示すると、図 3.2.3-1のようになる。



図 3.2.3-1 一次元排気圧縮試験の模式図

図 3.2.3-2に一次元圧縮試験から得られる結果の反映先と理論展開フローを示す。図中の赤 字が材料毎に異なるパラメータである。様々な材料で一次元圧縮試験を実施し、フローに従 って結果の整理を行うと、最終的には材料毎の完全飽和線が得られることになる。材料毎の 完全飽和線の変化を化学的変質として平衡論的にまとめると最終的には力学モデルに化学変 質を考慮できる。

前述のように、前研究フェーズにおいて実施した検討で導入したベントナイト系人工バリ アの力学概念では、このようにして得られる完全飽和線は正規圧密曲線、ゼロ空隙曲線、平 衡膨潤圧・膨潤量線であることが示されている。よって本検討で得られた完全飽和線から得 られる正規圧密曲線、ゼロ空隙曲線、平衡膨潤圧・膨潤量線などの妥当性に関しても検討を 行う(図 3.2.3-3参照)。



図 3.2.3-2 一次元圧縮試験の反映先と理論展開



図 3.2.3-3 一次元圧縮試験のモデル構築への反映イメージ

2) 試験結果

図 3.2.3・4に変質後人工ベントナイトの一次元圧縮試験結果を示す。図には低変質人工ベントナイトから高変質人工ベントナイトまでをそれぞれ示している。図から、変質後人工ベントナイトの完全飽和線が、

$$\rho_d / \rho_W = 0.156 \ln \sigma'_V + \bar{\rho} \qquad (\vec{\mathfrak{x}} \ 3.1)$$

として得られた。ただし、ここで、 ρ は基準乾燥密度であり、あるベントナイトの膨潤圧が 1MPa となるときの乾燥密度 ρ_a^* と水の単位体積質量 ρ_w を用いて、

$$\overline{\rho} = \frac{\rho_d^*}{\rho_w}$$

として定義した。基準乾燥密度は変質の度合いが増す毎に増加して、低変質の場合は 1.43、 中変質の場合は 1.39、高変質の場合は 1.37 であった。なお、高変質のケースにおける完全飽 和線の決定では、高含水比の試料の飽和点を無視した。これは、この高含水比の試料を排気 圧縮中に得られる等含水比線の勾配が他の 2 ケースと比べて大きく異なっているためである。 一次元排気圧縮試験は、間隙水よりも間隙空気が先に排出されることが前提となっているた め、高含水比の場合試験を非常にゆっくりと行う必要があるなど、その実施が難しくなる。 高含水比のケースの再現性を確認するとともに、含水比を更に変化させたケースを追加して 試験を行う必要がある。

変質後人工ベントナイトの等飽和度線は、これまでに検討した材料の結果に比べ、直線的 であり、飽和乾燥密度に漸近しても、過剰間隙水圧が発生していないことが特徴的である。 これは、前フェーズで実施したモンモリロナイト含有率が20%の人工ベントナイトの場合で も同様の結果であったため、モンモリロナイトの含有率が少ないために透気係数が大きいこ とが理由と考えられる。

さらに、図 3.2.3-5には、変質後人工ベントナイトの等飽和度線と平成 24 年度までに取得

した、モンモリロナイト含有率が 100%のクニピア F、59%クニゲル V1、20%の人工ベント ナイトの完全飽和線の比較を示している。

図から、各材料の完全飽和線は、互いに平行であり、(式 3-2)で与えられることが分かった。

$$\rho_a / \rho_w = C_a \ln \sigma'_v + \bar{\rho} \tag{\vec{x} 3-2}$$

クニピア系のモンモリロナイトを含む材料のこれらのパラメータを表 3.2.3·3に示す。表 3.2.3·3には、(式 3·3) で定義したモンモリロナイト変質率β_mも示した。

$$\beta_{mnt} = \frac{W_{anl}}{W_{mnt0}} \tag{₹ 3-3}$$

ただし、 W_{anl} はアナルサイムの乾燥質量、 W_{mn0} は変質前のモンモリロナイトの乾燥質量である。また、 σ'_{vmax} は乾燥密度が土粒子密度と一致する、すなわち間隙比がゼロとなる圧力である。



図 3.2.3-4 変質後人工ベントナイトの一次元圧縮試験結果



図 3.2.3-5 変質後人工ベントナイトの完全飽和線と既往の結果の比較

材料	モンモリロナイト 含有率 amm(%)	モンモリロナイト 変質率 βmm (%)	C _a	基準乾燥密度 <i>戸</i>	σ' _{vmax} (MPa)
クニヒ [°] ア F	100	0		1.35	9330
クニケ [*] ル V 1	59	0		1.45	3730
人工ベントナイト	20	0	0.156	1.77	331
	29.5	50	0.150	1.39	1762
変質後人工ベントナイト	$\overline{20}$	66.1		$1.\overline{37}$	1831
	40	32.2		1.43	$16\overline{63}$

表 3.2.3-3 各材料の完全飽和線のパラメータ

ここで、モンモリロナイト変質率 β_m と基準乾燥密度 $\overline{\rho}$ の関係を図 3.2.3-6に示す。



図 3.2.3-6 モンモリロナイト変質率と基準乾燥密度の関係

図では、初期のモンモリロナイト含有率が 0.59 の場合の結果から、モンモリロナイト変質 率 β_{mr} と基準乾燥密度 $\bar{\rho}$ の関係を、

$$\overline{\rho} = -0.12\beta_{mnt} + \overline{\rho}_0 \tag{\vec{x} 3-4}$$

とした。ここで、 $\bar{\rho}_0$ は、変質前の基準乾燥密度である。(式 3-3)では、変質前のモンモリ ロナイトに依らず、モンモリロナイトの変化率に対する基準乾燥密度の変化割合が-0.12 で一 定であると仮定した。

さらに、この変質前の基準乾燥密度 $\bar{\rho}_0$ とモンモリロナイト含有率 α_{mnt} の関係は、図 3.2.3-7 のようになる。



図 3.2.3-7 変質前の基準乾燥密度とモンモリロナイト含有率の関係

よって、(式 3-3) は、

$$\bar{\rho} = -0.12\beta_{mnt} + \frac{1.35}{\alpha_{mnt0}^{0.17}}$$
 (式 3-5)

として表される。

ここで、モンモリロナイト含有率毎のベントナイトの土粒子密度 ρ_{s-ben} は、随伴鉱物の土粒子密度を ρ_{s-acc} 、モンモリロナイトの土粒子密度を ρ_{s-mn} とすると、

$$\frac{\rho_{s-ben}}{\rho_w} = (1 - \alpha_{mnt0}) \frac{\rho_{s-acc}}{\rho_w} + \alpha_{mnt0} \frac{\rho_{s-mnt}}{\rho_w}$$
(式 3-6)

で表される。(式 3-6) も図 3.2.3-7に併せて示す。(式 3-5) と(式 3-6)の交点は、ベントナイトを土粒子密度まで締固めないと基準膨潤圧 1MPa を発揮できないモンモリロナイト含有率を示しており、交点よりもモンモリロナイト含有率が下がると、土粒子密度以上にベントナイトを締固めなければ基準膨潤圧 1MPa を発揮できないことになる。このため、モデル上の下限値 α_{mnt}^{min} と考えても実用上差し支えない。よって本モデルの場合、 α_{mnt0} の取りうる範囲は、

$$0.02 ≤ α_{mnt0} ≤ 1$$
 (式 3-7)

とした。なお、この下限値は、基準膨潤圧を低減させたり、図 3.2.3-7の近似式を変更した りすることによって変化するが、現実的なモンモリロナイト含有率の範囲をカバーしている ことや、モデルが複雑化することを避けるためにこれ以上の議論は避ける。

ここで、変質によりある割合がアナルサイム化したモンモリロナイト含有率 α_{mnt} は、アナルサイム以外の随伴鉱物の乾燥質量を W_{acc} 、変質後のモンモリロナイトの乾燥質量 W_{mnt} として

$$\alpha_{nnt} = \frac{W_{nnt}}{W_{acc} + W_{nnt} + W_{anl}} \tag{\mathcal{T} 3-8}}$$

で表され、さらに、変質後のモンモリロナイトの乾燥質量Wmuは、

$$W_{mnt} = W_{mnt0} - W_{anl} = W_{mnt0} - \beta_{mnt} W_{mnt0} = (1 - \beta_{mnt}) W_{mnt0}$$
 (式 3-9)

で表されるため、変質によりある割合がアナルサイム化したモンモリロナイト含有率 amu は、

$$\alpha_{nnnt} = \frac{(1 - \beta_{nnnt})W_{nnnt0}}{W_{acc} + (1 - \beta_{nnnt})W_{mnt0} + \beta_{nnnt}W_{mnt0}} = \frac{(1 - \beta_{nnnt})W_{mnt0}}{W_{acc} + W_{mnt0}} = (1 - \beta_{nnnt})\alpha_{mnt0}$$
(式 3-10)

となる。ここで、*α_{mn0}*は変質前のモンモリロナイト含有率であり、本検討で使用しているク ニゲル V1 では 0.59 である。

以上の議論では、初期モンモリロナイト含有率とモンモリロナイトのアナルサイム化を個 別に考えてきた。初期モンモリロナイト含有率は、ケイ砂含有率や随伴鉱物の量によって変 化するが、概ねケイ砂と同等と考えても良い。このケイ砂含有率が増加することとアナルサ イム化する(アナルサイム含有率が増加する)ことは、どちらもモンモリロナイト含有率の 低下という意味では同じである。しかしながら、ケイ砂は土粒子密度が 2.65Mg/m³程度であ るのに対してアナルサイムは 2.2Mg/m³程度であるため、モンモリロナイトが溶解後に二次 鉱物として沈殿した際の土粒子密度が、ケイ砂のようにモンモリロナイトの土粒子密度 2.8 Mg/m³程度に近い鉱物の場合は間隙体積があまり変化しないが、アナルサイムのようにモン モリロナイトの土粒子密度よりも小さい鉱物として沈殿した場合は、間隙体積を大きく減少 させることになる。間隙体積の現象は、土粒子骨格同士の接触点数の増加に繋がる為、有効 応力が増加する。そのため、図 3.2.3-8に示すように、高土粒子密度の随伴鉱物の増加に伴う モンモリロナイト含有率の低下では 1MPa を発揮するのに必要な乾燥密度(基準乾燥密度) は増加し、低土粒子密度の随伴鉱物の増加に伴うモンモリロナイト含有率の低下では 1MPa を発揮するのに必要な乾燥密度(基準乾燥密度)は低下する。



図 3.2.3-8 変質前の基準乾燥密度とモンモリロナイト含有率の関係

このような議論を踏まえて、モデル上はあるベントナイトを、出発物質をモンモリロナイ ト単体として、そこから χ_{mnt} だけ変質して現在の状態に至っていると考えることもできる (χ_{mnt} は非モンモリロナイト鉱物含有率)。この場合のモンモリロナイト含有率は、(式 3-10) を用いて、

$$\alpha_{mnt0} = (1 - \chi_{mnt}) \cdot 1 \qquad (\vec{\mathfrak{r}} \ 3 \cdot 11)$$

で表される。よって、(式 3-5)

$$\bar{\rho} = -0.12\beta_{mnt} + \frac{1.35}{(1 - \chi_{mnt})^{0.17}}$$
(式 3-12)

と表される。本年度の検討では、高土粒子密度化は考慮していないため、 χ_{mut} は 0.41 で一定である。

ここで、間隙比がゼロとなる(乾燥密度が土粒子密度と一致する)圧力 σ'_{vmax} は、(式 3-2)から、

$$\sigma'_{V\text{TMAX}} = \exp\left(\frac{\bar{\rho}_{S} / \rho_{W} - \bar{\rho}}{C_{a}}\right) = \exp\left(\frac{\bar{G}_{s} - \bar{\rho}}{C_{a}}\right),$$

で与えられるから、(式 3-5)を用いて、

$$\sigma'_{v\max} = \exp\left(\frac{\bar{G}_s - \bar{\rho}}{C_a}\right) = \exp\left(\frac{\bar{G}_s + 0.12\beta_{mnt} - \frac{1.35}{(1 - \chi_{mnt})^{0.17}}}{C_a}\right)$$
(7)

と表される。ただし、 $\bar{\rho}_s$:変質後のバルクの土粒子密度、 \bar{G}_s :変質後のバルクの土粒子比重である。(式 3·2)を変形すれば、変質後人工ベントナイトの $e \sim \ln p$ '関係が(式 3·14)で与えられる。

$$e = \frac{C_a \ln \frac{\sigma'_{\nu \max}}{\sigma'_{\nu}}}{\bar{G}_s - C_a \ln \frac{\sigma'_{\nu \max}}{\sigma'_{\nu}}}$$
(7)

ここで、変質後のバルクの土粒子密度 ps は、

$$\overline{\rho}_{s} = a\rho_{s-acc} + b\rho_{s-mnt} + c\rho_{s-anl}$$

で表され、各係数は、

$$a = \frac{W_{s-acc}}{W}$$
, $b = \frac{W_{s-nunt}}{W}$, $c = \frac{W_{s-anl}}{W}$

となる。ここで、

$$W = W_{s-acc} + W_{s-mnt} + W_{s-anl}$$

である。さらに、定義から、

$$a = \frac{W_{s-acc}}{W} = 1 - \alpha_{mnt0} = \chi_{mnt}$$
$$b = \frac{W_{s-mnt}}{W} = \alpha_{mnt} = \alpha_{mnt0} \left(1 - \beta_{mnt}\right) = \left(1 - \chi_{mnt}\right) \left(1 - \beta_{mnt}\right)$$
$$c = \frac{W_{s-anl}}{W} = \frac{W_{s-mnt0}}{W} \frac{W_{s-anl}}{W_{s-mnt0}} = \alpha_{mnt0} \beta_{mnt} = \left(1 - \chi_{mnt}\right) \beta_{mnt}$$

であるから、変質後のバルクの土粒子比重 G.は、

$$\overline{G}_{s} = \frac{\overline{\rho}_{s}}{\rho_{w}} = \chi_{mnt} \frac{\rho_{s-acc}}{\rho_{w}} + (1 - \chi_{mnt})(1 - \beta_{mnt})\frac{\rho_{s-mnt}}{\rho_{w}} + (1 - \chi_{mnt})\beta_{mnt} \frac{\rho_{s-anl}}{\rho_{w}}$$
(式 3-15)

を得る。ただし、 ρ_{s-acc} はアナルサイム以外の随伴鉱物の土粒子密度、 ρ_{s-anl} はアナルサイムの土粒子密度である。また、モンモリロナイトのアナルサイム化以外の鉱物化を考えない場合は、 $(1-\chi_{mat})=\alpha_{mat0}=0.59$ としてもよい。

(式 3-13)、(式 3-15)を(式 3-14)に代入して得られる *e*~ln *p*'関係を図示すると図 3.2.3-9 のようになる。図には、前研究フェーズで取得した、モンモリロナイト含有率が 100%のク ニピア F、59%のクニゲル V1、20%の人工ベントナイトの*e*~ln *p*'関係も併せて示している。

図から、一次元圧縮試験から得られた変質後の人工ベントナイトのe~lnp'関係は、変質前の人工ベントナイト(クニゲルV1)とほぼ同等であった。両者のe~lnp'関係を比較すると、モンモリロナイト含有率が変質によって低減しているのにもかかわらず、e~lnp'関係はあまり変化していない。モンモリロナイト含有率が20%の変質前人工ベントナイトと変質率70%の変質後人工ベントナイトはモンモリロナイト含有率がほぼ同等であるが、変質率70%の変質後人工ベントナイトの方が、e~lnp'関係が上側に存在している。このことからも、モンモリロナイトの減少に伴う膨潤圧の減少を、土粒子密度の低下(土粒子体積の増加)に伴う間隙体積の減少による土粒子骨格の形成、土粒子同士の接触点の増加などが補っているものと考えられる。



図 3.2.3-9 変質後人工ベントナイトのe~lnp'関係

3) 完全飽和線の高度化案その1

これまで用いてきた完全飽和線は、一次元排気圧縮試験結果に基づいて次式で表される。

 $\rho_d / \rho_w = C_a \ln \sigma'_v + \bar{\rho} \qquad (\vec{\mathfrak{T}} \ 3\text{-}16)$

しかしながら、後述する荷重制御膨潤量試験結果の内、低応力レベルの結果と完全飽和線 との差異が大きいことが分かってきた。本検討で実施している一次元排気圧縮試験で低応力 レベルの飽和点(高間隙比での平衡膨潤圧と膨潤量の点)を直接求めるためには、高含水比 に調整した材料の一次元排気圧縮試験を行う必要があるが、過剰間隙水圧が発生し易いため に試験が難しい。さらに、低応力レベルでは摩擦の影響が大きいために、試験結果の解釈も 難しくなる。このような理由により、一次元排気圧縮試験から、高応力レベルから低応力レ ベルの完全飽和線が乾燥密度と圧縮応力の対数軸の平面において直線であるかどうかを確か めることが困難なのが現状である(図 3.2.3-4)。

この荷重制御膨潤量試験結果と一次元排気圧縮試験結果の差異には、幾つかの理由が考え られるものの、モデルとして多様な膨潤挙動を表現できるように高度化することは重要であ る。そこで、新たなパラメータを導入して、完全飽和線の表現能力を高めることとした。 (式 3-17) に新しいパラメータσ', min を導入した完全飽和線を示す。

$$\rho_d / \rho_w = C_a \ln \left(\sigma'_v - \sigma'_{v\min} \right) + \overline{\rho} \qquad (\vec{x} \ 3-17)$$

図 3.2.3-10に σ'_{vmin} を導入した完全飽和線を示す。図に示す通り、 σ'_{vmin} を導入した完全飽 和線は、応力が $P = \sigma'_{vmin}$ の直線に漸近するに従って乾燥密度が急激に低下する。また、この σ'_{vmin} の導入では、これまで実験結果と整合が取れていた応力レベルの完全飽和線はほとんど 変化しないことも分かる。



図 3.2.3-10 新しいパラメータを導入した完全飽和線

(式 3-17) を従来の完全飽和線と同じ手順で e-logP(e-lnP、以下 e-logP) 関係に書き換 えると(式 3-18)のようになる。

$$e = \frac{C_{\alpha} \ln \frac{(\sigma'_{\text{vmax}} - \sigma'_{\text{vmin}})}{(\sigma'_{\nu} - \sigma'_{\text{vmin}})}}{G_{s} - C_{\alpha} \ln \frac{(\sigma'_{\text{vmax}} - \sigma'_{\text{vmin}})}{(\sigma'_{\nu} - \sigma'_{\text{vmin}})}}$$
(₹ 3-18)

図から、 σ'_{vmin} を導入したことにより、低応力レベルの完全飽和線が σ'_{vmin} の値に応じて高 間隙比に推移しているのが分かる。この σ'_{vmin} を用いて、前フェーズで実施したクニピア F とクニゲル V1 の荷重制御膨潤量試験結果に完全飽和線が整合するように σ'_{vmin} を決定する と、図 3.2.3-12に示すように、どちらの材料の場合も $\sigma'_{vmin} = 0.04 MPa$ となった。

以上の結果から、σ'_{vmin}の導入によって完全飽和線は、従来から整合していた応力レベルの 膨潤挙動は変化することなく、完全飽和線とは整合しなかった応力レベルの膨潤挙動を上手 く表すことができる高度化であると言える。また、定式化などはほとんど変わらないため、 解析への導入も容易である。



図 3.2.3-11 新しいパラメータを導入した e-logP 関係



図 3.2.3-12 新しいパラメータの効果

4) 完全飽和線の高度化案その2

図 3.2.3・10に示した新しいパラメータを導入した完全飽和線は、実際の膨潤量試験の結果 と完全飽和線が整合するようにすることが容易であることを示した。その一方で、非常に低 密度でも有意な膨潤圧が存在するような不合理さを兼ね備えている。例えば、クニゲル V1 の液性限界である含水比 500%程度やブリーディングが発生する限界の含水比 1050%程度に 相当する乾燥密度 0.186Mg/m³や 0.092Mg/m³のベントナイトが吸水膨潤することはほとん どないものと考えられる。完全飽和線がこのような乾燥密度に漸近するように修正するため には、(式 3・17)に示した式を(式 3・19)のようにしなければならない。

$$\rho_d / \rho_w = C_a \ln \left(\sigma'_v + \sigma'_{v\min} \right) + \overline{\rho} \qquad (\vec{\mathfrak{R}} \ 3\text{-}19)$$

図 3.2.3-10に σ'_{vmin} を導入した完全飽和線を示す。図に示す通り、 σ'_{vmin} を導入した完全飽 和線は、応力が低下するに従って乾燥密度 ρ_d/ρ_w が $C_a \ln(\sigma'_{vmin}) + \bar{\rho}$ 漸近することが分かる。ただし、この σ'_{vmin} の導入によって、低応力レベルにおける乾燥密度が大きめに見積もられることになる。



図 3.2.3-13 新しいパラメータを導入した完全飽和線

(式 3-19)を従来の完全飽和線と同じ手順で e-logP 関係に書き換えると(式 3-20)のようになる。(式 3-20)を図示すると図 3.2.3-14のようになる。図に示すように、膨潤量が所定の間隙比に漸近するように変化していることが分かる。

 $e = \frac{C_{\alpha} \ln \frac{(\sigma'_{vmax} + \sigma'_{vmin})}{(\sigma'_{v} + \sigma'_{vmin})}}{Gs - C_{\alpha} \ln \frac{(\sigma'_{vmax} + \sigma'_{vmin})}{(\sigma'_{v} + \sigma'_{vmin})}}$ (\vec{x} 3-20)



図 3.2.3-14 新しいパラメータを導入した完全飽和線 e-logP 関係

図 3.2.3-15には、前フェーズで実施したクニピア F とクニゲル V1 の荷重制御膨潤量試験 結果に、完全飽和線が整合するように C_a 、 σ'_{vmax} 、 σ'_{vmin} を決定するした結果を示している。ク ニゲル V1 に関しては、材料分離が発生する含水比に相当する間隙比に漸近するように各パ ラメータを調整した。クニピア F に関してはクニゲル V1 のパラメータを参考にして試験結 果と整合するように決定した。

図に示すように、試験結果に完全飽和線を整合させるようにパラメータを決定すると、物理的な意味が曖昧になってしまうことが分かる。例えば、間隙比がゼロとなる応力 σ'_{νmax} が 100~200MPa と非常に小さい応力レベルであったり、完全飽和線の傾き C_a が試験から得られる値である 0.156 よりも非常に大きな 0.25 であったりしている。



図 3.2.3-15 新しいパラメータの効果

5) 完全飽和線の高度化まとめ

完全飽和線に基づくベントナイトの膨潤挙動のモデル化に関して高度化案を示した。両案 の得失をまとめると表 3.2.3-4のようになる。いずれも一長一短があるが、実用的な応力レベ ルにおいては案1の方が更なる検討に値すると考えられる。

定式化上は、両者の違いは o', min の符号のみであり、どちらも並行して検討可能である。よって、今後、両案の特性を踏まえつつ、試験結果を説明できるモデルを構築したい。

表 3.2.3-4 各材料の完全飽和線のパラメータ

案	完全飽和線	長所	短所
1	$\rho_d / \rho_W = C_a \ln \left(\sigma'_v - \sigma'_v \min \right) + \overline{\rho}$	パラメータの物理的意味が明確で	液性限界や材料分離が生じる含水
		ある。	比でも有意な膨潤圧が発生(膨潤
			圧に下限が存在)
2	$\rho_d / \rho_W = C_a \ln \left(\sigma'_v + \sigma'_{vmin} \right) + \overline{\rho}$	液性限界や材料分離が生じる含水	パラメータの物理的意味が曖昧に
		比では膨潤しない(膨潤量の上限	なる
		を設定可能)	

- (2) 膨潤举動取得試験(荷重制御膨潤量試験)
 - 1) これまでの成果

本検討では、ベントナイトの膨潤を弾塑性力学の観点から、「ベントナイトは、吸水するだ けで応力履歴を忘れてしまう弾塑性材料」と見なし、この概念を試験によって検証してきた。 試験手順は次の通りである。

- ① クニピア F とケイ砂及びアナルサイムを所定の重量比で混合したものを準備する。
- ② 各試料を締固めモールドにセットし、乾燥密度 1.6Mg/m³になるように締固める。
- ③ 体積一定条件で膨潤圧試験を行う。
- ④ 平衡膨潤圧に達したことを確認したら、0.1、0.2、0.5、1.0MPa 程度の荷重一定条件 で膨潤量試験を行う。

⑤ 上記の試験ケースの内、0.2MPaのケースに関しては、平衡状態に達したことが確認 されたら 0.1MPaに上載圧力を低下させる。

この試験のメリットは、様々なモンモリロナイト含有率の膨潤線を同時並行で取得できる 点である。なお、モンモリロナイト含有率などの配合が変化することで、見かけの土粒子密 度が変化するため、乾燥密度を 1.6Mg/m³ にそろえて試験した場合、その乾燥密度に相当す る間隙比が若干変化することになる。

これまでに実施した試験ケースを表 3.2.3-5にまとめて示す。これらの試験から得られた平 衡時の膨潤圧と間隙比が、各材料を用いて実施された前述の一次元排気圧縮試験から得られ る完全飽和線に到達するかどうかを判断することで、ベントナイト系人工バリア材料が、膨 潤によって応力履歴を忘れ、正規化するという概念の確からしさを示すことができる。

年度	材料	初期乾 燥密度 Mg/m ³	モンモリロナイト 含有率 wt%	試験ケース
<u>ц</u> 99	ケイ砂含有 Na 型モンモリロナイト(人工ベントナイト)	16	30,59,100	各1セット
1122	クニゲル V1(天然ベントナイト)	1.0	59	1セット
цоэ	人工ベントナイト	16	20	1セット
1125	MX80(天然ベントナイト)	1.0	天然鉱物	1セット
H24	MX80(天然ベントナイト)	16	天然鉱物	0.1MPa、0.25
1121		1.0	2 4 11 12 1 12	MPa、1.5 MPa
				0.1MPa、
H25	変質後ベントナイト(変質率:0.5)	1.6	29.5	$0.2 \Rightarrow 0.1 \mathrm{MPa}$ 、
				0.5MPa,1.0 MPa

表 3.2.3-5 既往の荷重制御膨潤量試験数量

※ 1セットにつき、1.5、1.0、0.5、0.25、0.1MPaの死荷重を付与

図 3.2.3-16に、試験結果として膨潤量の経時変化を示す。図から、上載圧力が一定の場合は モンモリロナイト含有率がほぼ同じである変質後の人工ベントナイト(モンモリロナイト含 有率 29.5%)と H22 年度に実施した人工ベントナイト(モンモリロナイト含有率 30%)は同 等の挙動を示している。このことから、二次鉱物が膨潤挙動に及ぼす影響は小さく、膨潤挙 動はモンモリロナイト含有率が支配的であることが分かった。

図 3.2.3-16の結果の内、変質後人工ベントナイト、クニゲル V1、人工クニゲル V1、クニ ピア F の結果を e-logP 平面に示すと図 3.2.3-17のようになる。図に示す通り、モンモリロナ イト含有率が同等なクニゲル V1 と人工ベントナイト(モンモリロナイト含有率 59%)では 大きな相違がないことが分かった。また、モンモリロナイト含有率が小さいほど、荷重制御 膨潤量試験の平衡値と完全飽和線との乖離が激しいことが分かった。



図 3.2.3-16 モンモリロナイト含有率毎の膨潤量試験結果



図 3.2.3-17 e-logP 平面における膨潤量試験結果

これまでに実施した試験結果をまとめると図 3.2.3-18になる。図 3.2.3-18では、各モンモ リロナイト含有率のベントナイトの平衡膨潤量を e-logP 平面に示している。この各モンモリ ロナイト含有率のベントナイトの平衡膨潤量から算出された間隙比 e を連ねた線は通常の地 盤材料であれば膨潤線に相当する。しかしながら、図から、高モンモリロナイト含有率の材 料ほど膨潤線は完全飽和線まで至っており、完全飽和線が正規圧密曲線と一致するという実 験事実に照らせば、モンモリロナイトは膨潤によって塑性化すると解釈できる。

さらに、モンモリロナイト含有率が低下すると平衡膨潤量は完全飽和線から乖離する傾向 がある。その大小関係は、随伴鉱物の土粒子密度の大きさに依存し、微粉砕ケイ砂のように 土粒子密度がモンモリロナイトと同程度の随伴鉱物の場合、平衡膨潤量は完全飽和線よりも 大きくなり、アナルサイムのように、土粒子密度がモンモリロナイトよりも小さい場合、平 衡膨潤量は完全飽和線よりも小さくなる。これは、モンモリロナイトの膨潤に対して、非膨 潤性随伴鉱物の土骨格構造の応力履歴が影響しているためと考えられる。



図 3.2.3-18 e-logP 平面における膨潤量試験結果と完全飽和線

2) 試験方法

これまでの試験結果から、

- 高モンモリロナイト含有率の材料ほど膨潤線は完全飽和線まで至っており、モンモ リロナイトは膨潤によって塑性化すると解釈できる。
- 低応力レベルでは、モンモリロナイト含有率が低下すると平衡膨潤量は完全飽和線から小さく、逆にモンモリロナイト含有率が高いと平衡膨潤量は完全飽和線から大きくなる傾向がある。

微粉砕ケイ砂のように土粒子密度がモンモリロナイトと同程度の随伴鉱物の場合、平衡膨潤 量は完全飽和線よりも大きくなり、アナルサイムのように、土粒子密度がモンモリロナイト よりも小さい場合、平衡膨潤量は完全飽和線よりも小さくなるという傾向が分かったため、 モンモリロナイトの膨潤に対して、非膨潤性随伴鉱物の土骨格構造の応力履歴が影響してい るとの推論が得られた。

完全飽和線は、粉体状態から飽和まで単調圧縮した場合の応力と乾燥密度(間隙比)の関係であるため、モンモリロナイト含有率が小さくても、随伴鉱物の土粒子密度が大きければ初期状態では骨格構造が形成されず、完全飽和線上では正規状態と考えられる。一方、随伴鉱物の土粒子密度が小さければ初期状態でも随伴鉱物の土粒子径が大きいために骨格構造が形成され、完全飽和線が大きく計測される。このため、随伴鉱物の土粒子密度の大きさと含有率によって完全飽和線と平衡膨潤量の関係が変化するものと考えられる(図 3.2.3-19参照)。ただし、膨潤時の随伴鉱物とモンモリロナイトの分離などの影響が考えられるため、検討が必要である。検討によって、随伴鉱物とモンモリロナイトの分離が確認されなければ、モンモリロナイト含有率が低下して非膨潤性随伴鉱物の土骨格構造(応力履歴)の影響が大きいと考えるのが自然である。この場合、ベントナイト系人工バリア材料の膨潤線(膨潤指数)は、モンモリロナイト含有率の関数とする必要がある。



図 3.2.3-19 随伴鉱物の土骨格構造と膨潤性鉱物の分離のイメージ

そこで本検討では、膨潤時の随伴鉱物とモンモリロナイトの分離の影響について調べるために、表 3.2.3-5に示す人工ベントナイトについて、荷重制御膨潤量試験を行い、試験前後にメチレンブルー吸着量試験を実施する。モンモリロナイト含有率の均一性の変化を図 3.2.3-20に示す方法で取得する。手順を以下に列挙する。

- ① 人工ベントナイトを乾燥密度 1.6Mg/m³に締固めた供試体を図 3.2.3-21に示すスライ サーでスライスする。
- ② ①で得られたスライスした各供試体に対してメチレンブルー吸着量試験を行い、モン モリロナイト含有率の均一性を確認する。
- ③ ①と同様に作成した供試体を死荷重 0.1MPa とした荷重制御膨潤量試験に供し、定常 状態に達したら、②と同様にスライスする。

 ④ ③で得られたスライスした各供試体に対してメチレンブルー吸着量試験を行い、モン モリロナイト含有率の均一性が変化していないかどうかを確認する。

モンモリロナイト	微粉砕ケイ砂	荷重	乾燥密度	
含有率 wt%	含有率 wt%	MPa	Mg/m^3	
80	20		1.6	
60	40	0.1		
40	60	0.1		
20	80			

表 3.2.3-6 荷重制御膨潤量試験数量



図 3.2.3-20 試験後のモンモリロナイト含有率の計測方法



図 3.2.3-21 解体用スライサー

3) 試験結果

図 3.2.3-22に、膨潤量の経時変化を示す。図から、上載圧力が一定の場合はモンモリロナ イト含有率が大きいほど膨潤量が大きい。これらの結果は、これまでの結果と整合している。 図 3.2.3-23には、変質後人工ベントナイト、クニゲルV1、人工クニゲルV1、クニピアFの 結果を e-logP 平面に図 3.2.3-22の平衡値を併せてプロットしている。図から、これまでの試 験結果と同様に、低応力レベルでは、モンモリロナイト含有率が低下する(20~40wt%)と平衡 膨潤量は完全飽和線から小さく、逆にモンモリロナイト含有率が高い(80wt%程度)と平衡膨 潤量は完全飽和線から大きくなる傾向がある。



図 3.2.3-22 モンモリロナイト含有率毎の膨潤量試験結果



図 3.2.3-23 e-logP 平面における膨潤量試験結果

表 3.2.3-7には、試験前後の供試体のモンモリロナイト含有率と乾燥密度の分布を示す。さらにこれらの結果を図示すると図 3.2.3-24のようになる。

試験前の供試体では、供試体上下面近傍の乾燥密度が小さいものの、モンモリロナイト含 有率は概ね均一であることが分かる。これは、モンモリロナイト含有率が質量割合であるた め、バルクの乾燥密度に無関係に鉱物の質量割合のみで決まるためである。

一方、膨潤量試験後では、モンモリロナイト含有率 20wt%のケースでは、密度分布に大き

な変化はなく、40wt%になると給水側のみが乾燥密度が小さく、モンモリロナイト含有率が 高い 60wt%や 80wt%では、膨潤によって全体的に乾燥密度が低下しながらも、給水側の方 が排水側よりも乾燥密度の低下割合が大きい傾向を示している。

モンモリロナイト含有率は、膨潤前後の乾燥密度の変化に比べて、ほとんど変化しない結 果となった。このことは、モンモリロナイトの膨潤に伴って随伴鉱物も一体となって移動し ていることを意味している。しかしながら、ベントナイトからモンモリロナイトを精製する 過程では水簸が行われ、モンモリロナイトと随伴鉱物の分離がなされることに鑑みれば、膨 潤変形が著しい(上載圧が小さい、乾燥密度が小さい)場合にはモンモリロナイトと随伴鉱 物が分離してしまうことが十分に考えられる。このため、今後も前述の完全飽和線の高度化 と併せて、モンモリロナイト含有率の不均一化の影響も調べる必要がある。

表 3.2.3-7 荷重制御膨潤量試験結果

設定値		<u>ウェノン の町部</u> 試験前		ウエルとの明朝	<u>古一, 大大大大大大大大大大大大大大大大大大大大大大大大大大大大大大大大大大大大</u>		
モンモリロナイト 含有率	乾燥密度	底面からの距離 (中心位置)	モンモリロナイト 含有率	乾燥密度	低面からの距離 (中心位置)	モンモリロナイト 含有率	乾燥密度
wt%	Mg/m ³	mm	wt%	Mg/m ³	mm	wt%	Mg/m ³
		0.250	77.95	1.302	0.251	76	0.642
		0.750	75.59	1.570	0.765	77	0.879
		1.251	77.17	1.592	1.278	77	0.806
		1.752	77.17	1.570	1.779	77	0.812
		2.252	76.38	1.528	2.280	76	0.782
		2.752	75.59	1.592	2.781	77	0.806
		3.252	75.59	1.641	3.282	77	0.888
		3.752	75.59	1.592	3.783	77	0.884
		4.252	77.17	1.507	4.284	77	0.847
80		4.842	74.80	1.420	4.784	76	0.877
					5.284	76	0.884
					5.788	75	0.844
					6.292	76	0.847
					6.793	76	0.854
					7.293	76	0.912
					7.794	75	0.734
					8.294	75	0.969
		T 16/#	5 0.00		8.804	74	1.047
		平均值	76.30	1.531	_	76	0.851
		0.250	59.06	1.309	0.258	57	0.755
		0.751	59.06	1.504	0.765	55	0.962
		1.252	59.06	1.525	1.265	56	0.990
	1.6	1.752	59.06	1.592	1.765	57	1.004
		2.252	59.06	1.616	2.265	55 54	1.047
		2.102	59.06	1.602	2.700	56	1.066
60		3.752	59.84	1.570	3 768	56	1.004
00		4 252	60.63	1.552	4 268	56	1.040
		4.840	60.63	1.357	4.772	56	1.109
					5.275	56	1.153
					5.775	54	1.181
				_	6.275	53	1.238
					6.961	53	1.225
		平均值	59.37	1.524	—	55	1.063
		0.251	41.73	1.242	0.250	43	1.025
		0.751	40.95	1.556	0.752	39	1.245
		1.252	41.73	1.522	1.254	39	1.365
		1.753	40.95	1.528	1.754	39	1.539
		2.253	41.73	1.581	2.255	39	1.485
40		2.752	41.73	1.599	2.755	39	1.563
		3.252	41.73	1.549	3.255	39	1.556
		3.752	41.73	1.542	3.755	37	1.570
		4.204	40.16	1.589	4.200	38 97	1.497
		4.044	40.10	1.550	4.000	20	1.508
		十均恒	41.20	1.020	0.050		1.441
		0.250	21.26	1.344	0.250	20	1.410
		1.250	21.20	1.042	0.701	20	1.017
		1.200	21.20	1.564	1.202	20	1.004
		2 250	21.20	1 599	2 253	20	1 592
20		2.750	21.26	1.599	2.754	20	1.493
		3.250	22.05	1.563	3.255	20	1.515
		3.750	21.26	1.542	3.759	20	1.559
		4.250	22.05	1.535	4.262	17	1.705
		4.827	22.05	1.446	4.761	18	1.584
		平均值	21.50	1.534		19.8	1.572



図 3.2.3-24 膨潤量試験前後の供試体の乾燥密度とモンモリロナイト含有率の分布

本検討の試験ケースでは、膨潤に伴うモンモリロナイト含有率の不均一化の影響が小さい という結果となったが、仮に供試体内に膨潤中にモンモリロナイト含有率の分布が発生する と、モンモリロナイト含有率と完全飽和線の移動量の関係は線形ではないため、バルクのモ ンモリロナイト含有率が同じであっても、膨潤圧や膨潤量の平衡値は完全飽和線と一致しな い可能性がある。この影響を調べるためには図 3.2.3-25のような供試体を用いた膨潤量、膨 潤圧試験が有効である。その一方で、モンモリロナイトと随伴鉱物が分離し始める乾燥密度 も調べる必要がある。



図 3.2.3-25 膨潤によるのモンモリロナイト含有率の不均一化の影響調査のイメージ

さらに、低モンモリロナイト含有率のベントナイトが完全飽和線と乖離する点については、 モンモリロナイトと随伴鉱物の分離が見られなかったため、完全飽和線(正規圧密線)と膨 潤線がモンモリロナイト含有率に応じてズレると考えることが自然である。この膨潤線と完 全飽和線はクニゲル V1 程度のモンモリロナイト含有率で一致していることから、両者のズ レは、モンモリロナイト含有率に対して線形ではなく、非線形であることが予想される。す なわち、

$$\kappa = C_{\alpha} \cdot f(\alpha_{mnt})$$

としてモデル化できる。ただし、 κ は膨潤指数、 $f(\alpha_{mnt})$ はモンモリロナイト含有率による膨潤指数への影響の関数である。この $f(\alpha_{mnt})$ の具体的な関数は、これまでに実施してきた完全飽和線と荷重制御膨潤量試験の結果をまとめ直すことによって取得することが可能となるが、さらなるデータの蓄積が必要である。



図 3.2.3-26 随伴鉱物の影響評価とモデル化のイメージ

(3) モンモリロナイトのせん断挙動

本検討では、これまでベントナイト系人工バリア材料の力学挙動として、膨潤挙動を中心に 取得してきた。これは、弾塑性力学においては相似(圧密)変形に類するものであり、得られ た結果は、弾塑性力学に立脚した構成モデルにおいては圧密項に反映される情報である。弾塑 性力学に立脚した構成モデルにおいけるせん断変形に反映すべき情報は、せん断試験から得ら れるが、ベントナイト系人工バリア材料のせん断挙動はあまり取得されておらず、力学モデル の構築のためにはせん断挙動の取得が求められてきた。

- 1) 膨潤圧がモンモリロナイトのせん断強度に及ぼす影響
 - a. これまでの試験結果

本検討では、せん断挙動のモデル化に向けた第一歩として、せん断挙動に膨潤圧が及ぼ す影響について調べた。具体的には、鉱物組成、間隙液組成、密度、飽和度が同じで膨潤 圧が異なるモンモリロナイト供試体のせん断強度を取得して、膨潤圧がせん断強度に及ぼ す影響を取得するとともに、膨潤圧を有効応力として取り扱うべきか、間隙水圧として取 り扱うべきかに関する議論に資する情報を取得した。

図 3.2.3-27には、粉砕方法が異なるモンモリロナイトの膨潤圧の経時変化を示している。
これらの材料は、粉砕方法が異なるだけで、鉱物組成、間隙液組成、密度、飽和度がほぼ 同じである。図から、鉱物組成、間隙液組成、密度、飽和度がほぼ同じであっても、粉砕 方法の違いにより、膨潤圧が倍半分で異なることが分かる。よって、この粉砕方法が異な る材料のせん断挙動を調べることによって、膨潤圧がせん断挙動に及ぼす影響を調べるこ とが可能となる。

なお、図 3.2.3-28に示す XRD の回折パターンから、この粉砕の過程で、回折パターン のピークが2~3層膨潤から、1~2 層膨潤状態にシフトしている。さらに、全体的に回 折パターンがブロードである。これは、粉砕過程で、シート状のモンモリロナイトの引き 裂かれるように粉砕されたのではなく、図 3.2.3-29に示すような二次粒子が劈開して細か な二次粒子になったために、比表面積が増えて自由水が吸着水となったためであると考え られる。このことは、別途実施された AFM によっても確認されている。

よって、力学的には、この粉砕過程によって材料は何ら変化しておらず、膨潤圧だけが 異なる材料と見なしてよい。さらに、粉砕作業に起因するメカノケミカル反応に関しても 考慮が必要であるとの指摘があるが、メカノケミカル反応が比表面積の増加に伴う化学的 な活性の増加だとすれば、粉砕中に上記のような二次粒子の劈開しか発生していないとす ると、メカノケミカル反応は、不活性な層間が粉砕という物理的な力によって活性化され、 水が浸透できる層間が増えることであると言える。これは、まさに膨潤圧だけが変わって いることに他ならず、膨潤中には、モンモリロナイトの層間の陽イオンに水分子が集まる だけで、化学的な変質が生じているわけではないため、セメント系材料のような材料の比 表面積の増加に伴う水和反応の促進などとは意味合いが異なるものと考えられる。



図 3.2.3-27 微粉砕モンモリロナイトの膨潤性能変化



図 3.2.3-28 XRD によるモンモリロナイトの粉砕によるアスペクト比の変化の確認結果



図 3.2.3-29 モンモリロナイトの粉砕によるアスペクト比の変化イメージ

図 3.2.3-30 にせん断試験のイメージを示す。本検討では、せん断試験として、等体積 一面せん断試験を実施する。これは、せん断前の膨潤圧試験が容易であること、せん断中 の体積拘束が容易であることなどのメリットがあるためである。図 3.2.3-30 に示すよう なせん断箱を図 3.2.3-31 に示す一面せん断試験機にセットしてせん断を行った。図 3.2.3-32 に示すように、下せん断箱には凹凸をつけたポーラスメタルを設置し、凸部を連 ねた位置にせん断面が発生するようにした。表 3.2.3-8 に試験ケースの一覧を示す。



図 3.2.3-30 せん断試験イメージ図



図 3.2.3-31 一面せん断試験機の全景



図 3.2.3-32 下せん断箱の凹凸を施したポーラスメタル

表 3.2.3-8 せん断試験ケース

鉱物	ミル	間隙液組成	乾燥密度(Mg/m³)	備考
モンモリロナイト (クニピア F)	0回	苏四十	1.2	膨潤圧の影響
	4回	<u>※</u> 亩小	1.2	等体積せん断

図 3.2.3-33 に供試体作製時の鉛直応力と摩擦応力の経時変化を示す。未粉砕試料に比べ、粉砕試料の方が供試体を作製するために必要な鉛直応力が3倍程度大きく、摩擦力も それに応じて3倍程度、大きいことが分かる。



図 3.2.3-33 供試体作製時の鉛直応力と摩擦応力

図 3.2.3-34 には、せん断中の供試体上下面の鉛直応力とせん断応力の関係を示す。本 試験は等体積せん断であるため、マクロ的には非排水条件となっており、せん断中に鉛直 応力が単調減少している。一方、せん断応力は、ピーク強度を示した後に強度を低下させ ながら残留状態に至っている。

図 3.2.3-35 には応力経路を示している。未粉砕試料の応力経路は正規粘土の非排水せん断パスを示しているが、粉砕試料の応力経路は軽い過圧密土の非排水せん断経路を示しているように見える。どちらの試料も十分に膨潤し、正規化しているものとして破壊基準が原点を通過するものと考えて強度定数 ϕ を求めると、未粉砕試料の ϕ はピーク時で 16.1°、残留時で 13.1°であった。一方、微粉砕試料の ϕ はピーク時で 13.1°、残留時で 9.4°であった。粉砕の有無で若干 ϕ が変化するものの、概ね同様の値であった。

本試験では、鉱物組成、間隙液組成、密度、飽和度がほぼ同じで膨潤圧だけが異なる供 試体のせん断試験を行い、膨潤圧がせん断強度に及ぼす影響を調べた。その結果、膨潤圧 が2倍程度大きくなると、せん断強度も2倍弱大きくなるという結果となった。このこと から、膨潤圧は、せん断強度の増加に寄与しており、少なくとも有効応力として取り扱う ことは妥当であると言える。



図 3.2.3-34 せん断中の鉛直応力とせん断応力の経時変化



図 3.2.3-35 せん断試験中のストレスパス

図 3.2.3-36 にせん断後の供試体とせん断面の状況を示す。凹凸をつけたポーラスメタル の凸部を結ぶ線でせん断が生じていることが分かる。本試験は、比較的短時間で膨潤圧試 験と非排水せん断試験が実施可能であり、ベントナイト系人工バリア材料のせん断挙動の 取得に有効な方法である。



図 3.2.3-36 せん断後の供試体とせん断面の状況

b. 試験方法(微粉砕の影響評価)

今年度の試験では、鉱物の微粉砕がそのせん断強度に及ぼす影響を調べるために、鉱物 組成、間隙液組成、密度、飽和度が同じ非膨潤性材料であるカオリンナイト供試体のせん 断強度を取得した。微粉砕の有無が強度に影響しないという結果が得られれば、メカノケ ミカルによるせん断強度への影響は小さいと言える。試験装置は図 3.2.3-30 と同様であ る。試験ケースを表 3.2.3-9 に示す。昨年度と比較して、異なる点は使用する粘土鉱物の 種類のみである。

表 3.2.3-9 微粉砕の影響評価試験ケース

鉱物	ミル	間隙液組成	乾燥密度 (Mg/m ³)	備考
カオリレナイト	0回	苏冈卡	1.2	膨潤圧の影響
	4回	※ 田小	1.2	等体積せん断

c. 試験結果

図 3.2.3-37 にカオリンの等体積一面せん断試験中の応力経路を示す。図には、図 3.2.3-35 に示したモンモリロナイトの応力経路も併せて示す。図から、微粉砕したカオリ ンは、微粉砕したモンモリロナイトに比べ、圧縮し難く、乾燥密度 1.2Mg/m³ に一次元排 気圧縮するのに 2.13MPa の鉛直応力が必要であった。これに対して、未粉砕カオリンで は、未粉砕モンモリロナイトに比べ乾燥密度 1.2Mg/m³ に一次元排気圧縮するのに必要な 鉛直応力は 0.23MPa であり、未粉砕のモンモリロナイトに比べて小さな鉛直応力であっ た。

地盤材料のような粉体材料の強度は、一般的に有効拘束圧に依存する。モンモリロナイ トもカオリンの場合、初期鉛直応力が大きい微粉砕試料の方が、せん断強度が増加した。 しかしながら、微視的に考えると、モンモリロナイトの場合、この有効拘束圧の増加分に はモンモリロナイトの膨潤圧と鉱物間の接触応力である有効応力が含まれるものと考えら れるが、カオリンの場合には、拘束圧の増加は、有効応力の増加分のみであると考えられ る。モンモリロナイトの有効拘束圧の増加のうち、モンモリロナイトの膨潤圧と鉱物間の 接触応力である有効応力を分離することが難しいため、図 3.2.3.37 から本検討の目的で もある、モンモリロナイトの膨潤圧が有効応力として強度増加に寄与するかどうかを、明確に判断することは難しい。そこで、図 3.2.3-37 を各試験の初期鉛直応力で無次元化することによって、初期鉛直応力の違いを排除して強度の相違を議論することとした。本試験では、せん断直前の乾燥密度も 1.2Mg/m³で揃えてせん断試験を行っているため、強度の増減に影響を及ぼす因子は膨潤圧の大きさのみである。図 3.2.3-38 に初期鉛直応力で 無次元化したせん断試験中のストレスパスを示す。図より、カオリンの場合では、粉砕の 有無がピーク強度や残留強度に及ぼす影響は小さいと言えるのに対して、モンモリロナイトの場合では、微粉砕することでピーク強度と残留強度が増加していることが分かる。このことからも、膨潤圧が強度増加にある程度寄与していると言える。



図 3.2.3-37 カオリンの等体積一面せん断試験中のストレスパス



図 3.2.3-38 初期鉛直応力で無次元化したせん断試験中のストレスパス

- 2) モンモリロナイトの非排水せん断挙動(一次元排気圧縮~等体積一面せん断試験)
 - a. 概要

一般的に自然体積粘土の力学挙動は、限界状態理論に基づいて記述されることが多く、 粘土の限界状態線は、その力学挙動を記述する上で重要な情報である。また、限界状態理 論によれば、せん断試験から得られる限界状態線は、e-logP 平面では正規圧密曲線とほぼ 平行に存在する。仮にベントナイト系人工バリア材料のせん断試験から得られる限界状態 線が正規圧密曲線と並行に存在する結果が得られれば、ベントナイト系人工バリア材料の せん断挙動のモデル化のために有用な情報である。そこで、本検討では、等体積一面せん 断試験を実施し限界状態線と正規圧密曲線と等価であることが示されている完全飽和線の 関係を調べる。

b. 試験手順とケース

試験手順は以下の通りである。

- 表 3.2.3-10 に示した所定の含水比に調整した人工クーゲル V1 を飽和点になるまで 一次元排気圧縮する。
- ② ①の工程で作製した飽和供試体を除荷することなく、そのまま一面せん断に供する。
- ③ せん断中は体積一定条件を課し、鉛直応力と水平応力を計測する。

このようにすれば、一連の手順で完全飽和線と限界状態線が得られ、両者を e-logP 平面 で整理することで、両者の関係を明確にすることができる。ただし、この際、既往の研究 から Ko 値は1を仮定して整理する。表 3.2.3-10 に試験条件を、図 3.2.3-39 に得られるせ ん断試験結果のイメージを示す。

鉱物	間隙液 組成	初期 含水比 (%)	飽和 乾燥密度 (Mg/m ³)	先行圧密圧力
↓ 丁 カー ガ カ ₩1	苏叼水	15	1.938	一次一排气口旋迟起不而得
八山/-/ // 1	※ 笛小	25	1.623	次几孙XIL.相迥挂 C 取得

表 3.2.3-10 等体積一面せん断試験ケース



図 3.2.3-39 せん断試験結果のイメージ

c. 試験結果

表 3.2.3-11 に供試体諸元を示す。本試験では、一般的な等体積一面せん断試験装置を 用いたため、表 3.2.3-10 に示した含水比 15%で飽和乾燥密度まで圧縮するためには荷重 が足りなかった。そのため、含水比 18%の飽和乾燥密度である 1.8Mg/m³程度を高密度ケ ースとして試験を実施した。

		No.1	No.2
土粒子の密度	Mg/m^3	2.7	768
下部ポーラスメタル溝体積	cm^3	1.3	819
直径	mm	60	60
高さ	mm	5.0	5.0
供試体体積	cm^3	15.457	15.457
湿潤質量	g	31.61	33.58
含水比	%	24.97	18.34
乾燥質量	g	25.30	28.38
湿潤密度	Mg/m^3	2.045	2.173
乾燥密度	Mg/m ³	1.637	1.836
間隙比		0.691	0.508
飽和度	%	100.0	100.0

表 3.2.3-11 供試体諸元

図 3.2.3-40 に一次元排気圧縮過程とせん断過程の乾燥密度と鉛直応力の関係、さらに 間隙比と鉛直応力の関係を併せて示す。図に示すように、せん断終了時の鉛直応力を乾燥 密度と鉛直応力の平面にプロットすると、その応力点を連ねた限界状態線は完全飽和線と 平行関係にあることが分かる。このため、間隙比と鉛直応力の平面においては、完全飽和 線と限界状態線が平行関係にならない。



図 3.2.3-40 一次元排気圧縮過程とせん断過程の乾燥密度と鉛直応力の関係と 間隙比と鉛直応力の関係

限界状態理論によれば[3]、ある応力比η(=q/p')で圧密された粘土の正規圧密曲線と限 界状態線の間隔は、次式で与えられる。

$$\Delta e = (\lambda - \kappa) \left(1 - \frac{\eta}{M} \right) \tag{\vec{x} 3-21}$$

ただし、λは圧縮指数、κは膨潤指数、Mは限界状態応力比である。このため、e~ ln p'平面において限界状態線と正規圧密曲線が応力に依らず平行関係にあることが分かる。

一方、図 3.2.3-40 したように、乾燥密度 $\rho_a \sim \ln p'$ 平面で限界状態線と完全飽和線が平行 関係にあると仮定すると、 $e \sim \ln p'$ 平面において限界状態線と正規圧密曲線は平行とはな らない。

ここで、飽和したベントナイトの静止土圧係数 Ko が 1 であったという実験事実[4]に基づいて、ベントナイトが等方材料であると仮定すれば、 $\eta(=0/p')=0$ であるから、(式 3-21)は、

 $\Delta e = \lambda - \kappa$ (式 3-22) となる。さらに、図 3.2.3-40 した $e \sim \ln p'$ 関係のように、低間隙比になるほど限界状態線 と正規圧密曲線の間隔が広がるためには、 λ か κ 、若しくは両者が低間隙比(高密度)にな るほど、 λ は大きく、 κ は小さくなる必要がある。ただし、これまでの試験結果から、 λ は完全飽和線の傾き C_a で決定し、クニピア系の材料では一定と考えられるため、 κ が変化 すると考えるのが妥当である。

ここで、限界状態理論に基づけは、(式 3-22)は、

$$\Delta e = \lambda - \kappa = (1 + e_0) MD \qquad (\vec{\mathfrak{T}} \ 3-23)$$

と書き直せるので、限界状態応力比Mやダイレイタンシー係数Dが間隙比(密度)に依存 するという取扱いも考えられる。

図 3.2.3-41 せん断変位とせん断応力の関係を示す。高密度のケースはピーク強度まで は線形的に応力が増加し、ピーク強度後に残留状態に漸近する傾向を示しているのに対し て、低密度のケースはピーク強度までの応力増加も緩やかであり、残留強度とピーク強度 の差異も小さい。これは、自然堆積粘土のせん断挙動に照らして考えれば、高密度のケー スが重い過圧密で低密度のケースが軽い過圧密状態であるようにも見える。

図 3.2.3-42 ストレスパスを示す。両者のストレスパスを比較すると、形状が明確に異なることが分かる。パスの立ち上がり方が異なることから、高密度のケースよりも低密度のケースにおいて負のダイレイタンシーが顕著である可能性がある。このことは、前述の $e \sim \ln p'$ 平面において限界状態線と正規圧密曲線は平行ではない理由として、限界状態応力比Mやダイレイタンシー係数Dが間隙比(密度)に依存するという考察と整合する。今後、試験ケースを増やして、再現性の確認や議論の信頼性を高める必要がある。







図 3.2.3-42 レスパス

3.2.4 水理特性

- (1) 透水試験
 - 1) これまでの試験結果

平成24年度までの検討では、ベントナイト系人工バリア材料の止水性能は、ベントナイト の主要鉱物であるモンモリロナイトが水と接触することにより膨潤し、その比表面積を増大 させるためであるという概念に基づいて、湿潤状態のベントナイト中のモンモリロナイトの 比表面積を体積拘束条件下で計測することによって透水係数を算出する方法を確立し、その 概念の妥当性について確認した。さらに平成25年度は、そのモンモリロナイトが非膨潤性材 料のアナルサイムになった場合について検討を行った。モンモリロナイトのアナルサイム化 が発生した場合、平成24年度までの概念によれば、比表面積を増大させるモンモリロナイト の割合が減少するため、止水性能は低下する可能性がある(内間隙の減少)。その一方で、モ ンモリロナイトの土粒子密度が 2.7Mg/m³ 程度であるのに対して、アナルサイムの土粒子密 度が 2.2Mg/m³ 程度であるため、同じ質量同士で比較すると土粒子体積はアナルサイムの方 が大きい。よって、モンモリロナイトが乾燥質量割合1:1でアナルサイム化したとすると、 間隙の体積が減少するため、止水性が向上する可能性もある(外間隙の減少)。

そこで、このようなモンモリロナイトのアナルサイム化に伴う止水性能の変化を実験的に 取得した。材料は、前述の変質後の人工ベントナイトである。また、バルクの乾燥密度は 1.6Mg/m³とした。透水試験は、フローポンプ式透水試験方法を採用し、通水圧が 1MPa 以 下となるように流量を 5.00E-04cc/min に制御して実施した。表 3.2.4-1に透水試験供試体の 配合、表 3.2.4-2に透水試験ケースを示す。試験は、同じ条件で 2 回実施した。

表 3.2.4-1 透水試験供試体の配合

材料	乾燥密度 Mg/m ³	モンモリロナイト 含有率 wt%	アナルサイム 含有率 wt%	模擬随伴鉱物 (微粉砕ケイ砂) wt%	試験数
変質後人工 ベントナイト	1.6	29.5	29.5	41%	2

表 3.2.4-2 透水試験ケース

	土粒子の	含水比	間隙比	湿潤密度	乾燥密度	直径	高さ	制御流量	
	密度 $\rho_{\rm s}$	W_0	e_0	$ ho_{ m t}$	$ ho_{ m d}$	D	h	q	備考
	Mg/m ³	-	%	Mg/m ³	Mg/m ³	mm	mm	cc/min	
Case1	2.604	22.81	0.639	1.966	1.601	40	5	5.00E-04	最大通水圧
Case2	2.602	23.14	0.655	1.966	1.597	40	5	5.00E-04	1MPa

図 3.2.4-1には、既往の有効ベントナイト乾燥密度と透水係数の関係に、変質後の人工ベントナイトの透水試験結果を併せて示している。図には、前フェーズで取得した様々なベントナイト系人工バリア材料の透水係数も示している。図から、変質後の人工ベントナイト(モンモリロナイト含有率: 29.5%)はモンモリロナイト含有率 20%の人工ベントナイト(微粉砕ケイ砂 80%)とよりも透水係数が小さく、モンモリロナイト含有率 59%のクニゲル V1よりも大きいことが分かる。

図 3.2.4-2には、モンモリロナイト含有率と透水係数の関係を示す。図から、クニゲル V1 のモンモリロナイト(含有率 59%)の半分の 29.5%がアナルサイム化した影響で、その透水係 数は増加するが、その値は、モンモリロナイト含有率 29.5%の変質前の人工ベントナイトと ほぼ同等であることが分かる。このことから、モンモリロナイトが別の低土粒子密度の非膨 潤性鉱物に変質しても、止水性能に関しては、モンモリロナイト含有率から推定可能である と言える。このことは、乾燥密度 1.6Mg/m³ 程度の状態であれば、モンモリロナイトがアナ ルサイム化することによる外間隙の減少の影響は小さいことを意味する。さらに言えば、乾 燥密度 1.6Mg/m³ 程度の状態のベントナイト系人工バリアの止水性能は、その内間隙の止水



図 3.2.4-1 有効ベントナイト乾燥密度と透水係数の関係



図 3.2.4-2 モンモリロナイト含有率と透水係数の関係

2) 内間隙と外間隙

本研究では、図 3.2.4-3に示すようなモンモリロナイト鉱物の表面に水が1分子過不足なく 吸着している状態(2層水和状態)の含水比を2層膨潤含水比w^{*}として定義して、モンモリ ロナイトの比表面積*S*, を

$$S_{v} = 3.6 \times 10^{3} \times w^{*} \times \rho_{d} = 3.6 \times 10^{9} w^{*} \rho_{d} (m^{2} / m^{3} - soil)$$
(式 3-24)
として求められることを示した。ただし、 ρ_{d} は乾燥密度である。



図 3.2.4-3 モンモリロナイト含有率と透水係数の関係

さらに、内間隙が 2 層水和状態までとして定義すれば、内間隙比 e_{int} と外間隙比 e_{ext} が 2 層 水和含水比 w^{*}を用いて、

$$e_{int} = G_s w^* \tag{$\pi $3-25$}$$

$$e_{ext} = e - e_{int} = \frac{w_{sat}G_s}{1} - w^*G_s = (w_{sat} - w^*)G_s \qquad (\vec{x} \ 3-26)$$

と表されることを示した。ここで、 G_s は土粒子比重、eは間隙比、 w_{sat} は飽和含水比であり、 次式で与えられる。

$$w_{sat} = \frac{e}{G_s} (\times 100\%)$$
 (式 3-27)

これらの関係を図示すると、図 3.2.4-4のようになる。図中の ρ_a*は、飽和含水比と二層膨 潤含水比が一致する乾燥密度であり、外間隙がゼロとなり、全間隙と内間隙が一致する乾燥 密度でもある。既往の研究では、乾燥密度 1.7~1.8Mg/m³のモンモリロナイトは、2 層水和 状態であることが示されており、この結果と整合していることが分かる。



図 3.2.4-4 乾燥密度と全間隙比・内間隙比・外間隙比の関係

これらの成果により、Kozeny-Carman 則を用いてベントナイト系人工バリアの透水係数

を評価できるだけでなく、内間隙と外間隙が全体の透水係数に及ぼす影響を評価できるよう になった。なお、2 層膨潤含水比は、含水比をパラメータとした XRD 試験を行い、XRD パ ターンのピーク位置から取得した。図 3.2.4-6には含水比変化に伴う Na 型モンモリロナイト の XRD 回折パターンの推移を示す。図から、含水比の増加に伴って回折パターンのピーク が左側にシフトしているのが分かる。さらに、図 3.2.4-7には、XRD パターンのピーク分離に よる 2 層膨潤含水比の判断方法を示している。図には、含水比が 19%と 20%の Na 型モンモリロ ナイトの回折パターンに対してピーク分離を行った結果を示している。含水比が 19%から 20%に 増加することによって、2 層水和状態の回折ピークが減少し、3 層水和状態が卓越していることが 分かる。このように、2 層水和状態が卓越する最大の含水比を 2 層膨潤含水比とした。表 3.2.4-3 には、こうして求めた 2 層膨潤含水比と乾燥密度の関係を示す。この関係を用いれば、図 3.2.4-8に示すように、乾燥密度さえ分かれば 2 層膨潤含水比や比表面積を算出できるため、 Kozeny-Carman 則によって透水係数を決定することができる。



図 3.2.4-5 2 層膨潤計測用 XRD セル



図 3.2.4-6 含水比変化に伴う Na 型モンモリロナイトの XRD 回折パターンの推移



図 3.2.4-7 XRD パターンのピーク分離による 2 層膨潤含水比の判断

材料	w*	2 層膨潤含水比と乾燥密度の関係
Na モンモリロナイト (クニピア F)	0.19	$w^* = 0.01 \chi_{mnt} / (0.052 + 3.8 \chi_{mnt} E - 6 \rho_d^{-12.1 \chi_{max}})$
Ca モンモリロナイト (Ca 型化クニピア F)	0.15	$w^* = 0.01 \chi_{mnt} / (0.066 + 2.6 \chi_{mnt} E - 7 \rho_d^{-15.16 \chi_{mnt}})$
Na ベントナイト (クニゲル V1)	0.11	$w^* = 0.01 / (0.091 + 2.2E - 8\rho_d^{17.57})$ $\approx 0.01 \chi_{mmt} / (0.052 + 3.8 \chi_{mmt} E - 6\rho_d^{12.1 \chi_{mmt}})$
人工 Na ベントナイト (人工クニゲル V1)	0.11	$w^* = 0.01 / (0.091 + 2.2E - 8\rho_d^{17.57})$ $\approx 0.01 \chi_{mmt} / (0.052 + 3.8 \chi_{mmt} E - 6\rho_d^{12.1 \chi_{mmt}})$
Ca 型化ベントナイト (Ca 型化クニゲル V1)	0.09	$w^* = 0.01 / (0.11 + 3.9E - 11\rho_d^{-24.5})$ \$\approx 0.01\chi_mm / (0.066 + 2.6\chi_mm E - 7\rho_d^{-15.16\chi_mm})\$

表 3.2.4-3 2層膨潤含水比と乾燥密度の関係



図 3.2.4-8 Na型モンモリロナイトの2層膨潤含水比、比表面積と乾燥密度の関係

ここで、全間隙比 $_e$ 、内間隙比 $_{e_{int}}$ 、外間隙比 $_{e_{ext}}$ を Kozeny-Carman 則に適用した透水 係数は次式で表される。

$$k = \frac{1}{C} \frac{\rho g}{\mu} \frac{1}{S_v^2} \frac{e^3}{1+e} , \quad k_{int} = \frac{1}{C} \frac{\rho g}{\mu} \frac{1}{S_{vint}^2} \frac{e_{int}^3}{1+e_{int}} , \quad k_{ext} = \frac{1}{C} \frac{\rho g}{\mu} \frac{1}{S_{vext}^2} \frac{e_{ext}^3}{1+e_{ext}}$$
(式 3-28)

ここで、 $k_{int} \geq k_{ext}$ は内間隙比 $e_{int} \geq 外間隙比<math>e_{ext}$ で定義した、内間隙と外間隙の透水係数である。さらに、 S_{vint} は内間隙の比表面積、 S_{vext} は外間隙の比表面積であり、次式で定義した。

$$S_{vint} = S_v \left(\frac{e_{int}}{e}\right)^{\frac{2}{3}}, \quad S_{vext} = S_v \left(\frac{e_{ext}}{e}\right)^{\frac{2}{3}}$$
(7)

さらに、内間隙と外間隙に対して、同じ動水勾配が作用していると仮定すると、バルク の透水係数は、

$$k = k_{int} + k_{ext} \qquad (\vec{\mathfrak{T}} \ 3-30)$$

となり(並列モデル)、内間隙と外間隙には同じ流量が流れていると仮定すると、バルク の透水係数は、

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_{int}} + \frac{1}{k_{ext}}$$
 (式 3-31)

となる(直列モデル)。並列モデルは、バルクの透水係数が、 $k_{int} \ge k_{ext}$ のうち、大きい方で決まり、直列モデルは、バルクの透水係数が、 $k_{int} \ge k_{ext}$ のうち、小さい方で決まるという解釈もできる。

図 3.2.4-9には、これらの各透水係数と試験結果を併せて示す。試験結果との整合性という観点で評価すれば、内間隙の透水係数 k_{int}のみ、若しくは直列モデルがバルクの透水係数と整合していることが分かる。このことは、昨年度の変質後ベントナイトの透水試験において、乾燥密度 1.6Mg/m³ 程度の状態のベントナイト系人工バリアの止水性能がその内間隙の止水性で決まり、外間隙の影響は小さいという結果とも整合している。ただし、液種のイオン強度の変化や膨潤によって外間隙が大きくなった場合を想定すると、内間隙比だけでマクロな透水係数を決定するというのは難しい。そのため、直列モデルで透水係数をモデル化した方が汎用的であろう(図 3.2.4-10)。



図 3.2.4-9 間隙比と透水係数の関係



図 3.2.4-10 間隙比と透水係数の関係(直列モデルのみ)

3.2.5 力学・物質移動特性変化に関する試験のまとめ

(1) 変質後人工ベントナイト

変質前人工ベントナイトのモンモリロナイト含有率が 59%に対して、変質が激しいケース 変質後人工ベントナイトとして、モンモリロナイト含有率 20%、アナルサイム含有率が 39.5%、微粉砕ケイ砂が41%、変質が緩慢な変質後人工ベントナイトとして、モンモリロナイ ト含有率 40%、アナルサイム含有率が 19.5%、微粉砕ケイ砂が 41%、の2 通りの変質後人工 ベントナイトについて検討を行うべく、各試料を作製した。

(2) 土粒子密度

微粉砕アナルサイムと変質後人工ベントナイトの土粒子密度試験を実施した。微粉砕アナル サイムの土粒子密度が 2.288Mg/m³、変質後人工ベントナイトの土粒子密度が、高変質ケース では 2.527Mg/m³であり、低変質ケースでは 2.622Mg/m³となった。

(3) 完全飽和線

図 3.2.3-4に変質後人工ベントナイトの一次元圧縮試験結果を示す。図には低変質人工ベントナイトから高変質人工ベントナイトまでをそれぞれ示している。図から、変質後人工ベントナイトの完全飽和線が、

 $\rho_d / \rho_W = 0.156 \ln \sigma'_V + \overline{\rho}$

として得られた。ただし、ここで、 $\overline{\rho}$ は基準乾燥密度であり、あるベントナイトの膨潤圧が 1MPa となるときの乾燥密度 ρ_{d}^{*} と水の単位体積質量 ρ_{w} を用いて、

$$\overline{\rho} = \frac{\rho_d^*}{\rho_w}$$

として定義した。基準乾燥密度は変質の度合いが増す毎に増加して、低変質の場合は 1.43、中 変質の場合は 1.39、高変質の場合は 1.37 であった。

さらに、モンモリロナイト変質率 β_{m} として、

$$\beta_{mnt} = \frac{W_{anl}}{W_{mnt0}}$$

を導入して、モンモリロナイト含有率 α_{mt} と併せて以下のようなモデル化を行った。 試験結果から、初期モンモリロナイト含有率 α_{mnt0} とモンモリロナイト変質率 β_{mt} と基準乾燥密度 $\overline{\rho}$ の関係として、

$$\overline{\rho} = -0.12\beta_{mnt} + \frac{1.35}{\alpha_{mnt0}^{0.17}}$$

を得た。さらに、非モンモリロナイト鉱物含有率^Xmm を導入して出発物質をモンモリロナイト 単体として、そこから^Xmm だけ変質して現在の状態に至っていると考えることによって、

$$\overline{\rho} = -0.12\beta_{mnt} + \frac{1.35}{(1 - \chi_{mnt})^{0.17}}$$

とした。この基準乾燥密度と間隙比がゼロとなる(乾燥密度が土粒子密度と一致する)圧力 $\sigma'vmax$ は、一意の関係にあるため、このモンモリロナイト変質率を考慮した基準乾燥密度は $\sigma'vmax$ を介してモデルに導入することになる。この際、変質後のバルクの土粒子比重 \overline{G}_{s} は、

$$\overline{G}_{s} = \frac{\overline{\rho}_{S}}{\rho_{w}} = \chi_{mnt} \frac{\rho_{s-acc}}{\rho_{w}} + (1 - \chi_{mnt})(1 - \beta_{mnt})\frac{\rho_{s-mnt}}{\rho_{w}} + (1 - \chi_{mnt})\beta_{mnt} \frac{\rho_{s-anl}}{\rho_{w}}$$

を使用する必要がある。

このようなモデル化によって、モンモリロナイト変質率がe-logP関係に及ぼす影響について 調べたところ、モンモリロナイトの減少に伴う膨潤圧の減少を、土粒子密度の低下(土粒子体 積の増加)に伴う間隙体積の減少による土粒子骨格の形成、土粒子同士の接触点の増加などが 補っていることが推察された。

以上のモデル化の手順は、モンモリロナイトの種類や変質する鉱物を特定しなくても成立す る。すなわち、完全飽和線のモデルにおいて、基準乾燥密度を

$$\overline{\rho} = -A\beta_{mnt} + \frac{C}{\left(1 - \chi_{mnt}\right)^{B}}$$

として、Cは、対象のベントナイトの母材となるモンモリロナイト単体が膨潤圧 1MPa を発揮 する際の乾燥密度として取得できる。さらに A、B は、対象となるベントナイトの随伴鉱物や 変質シナリオによって考えられる二次鉱物などの含有率をパラメータとした排気圧縮試験から 取得できる。この際に、バルクの土粒子比重は

$$\overline{G}_{s} = \frac{\overline{\rho}_{s}}{\rho_{w}} = \chi_{mnt} \frac{\rho_{s1}}{\rho_{w}} + (1 - \chi_{mnt})(1 - \beta_{mnt})\frac{\rho_{s-mnt}}{\rho_{w}} + (1 - \chi_{mnt})\beta_{mnt}\frac{\rho_{s2}}{\rho_{w}}$$

で与えられる。この式では、モンモリロナイト以外の2種類の鉱物を考慮できるが、モンモリ ロナイトの土粒子密度と同等、若しくはそれよりも大きい鉱物のバルクの土粒子密度をまとめ て ρ_{s1} 、モンモリロナイトの土粒子密度よりも小さい鉱物のバルクの土粒子密度をまとめて ρ_{s2} とすれば、力学的には問題ないと思われる。 さらに、完全飽和線を高度化するために、新たに^σvmin なるパラメータを導入した。この パラメータの導入により、膨潤挙動の表現可能な範囲が拡大した。

$$\rho_d / \rho_W = C_\alpha \ln \left(\sigma'_v \pm \sigma'_{v \min} \right) + \overline{\rho}_d$$

 σ'_{vmin} の符号が負の場合、低応力レベル(高間隙、低密度領域)での膨潤量を精度よく合わせることが可能である。既往の荷重制御膨潤量試験結果を定式でフィッティングすると、 $\sigma'_{vmin} = 0.04 MPa_{cont}$

一方、^{σ'vmin}の符号が正の場合、材料分離限界の含水比(濃度)に相当する乾燥密度以下で は膨潤圧が発生しないことが表現可能である。ただし、その場合、モデルに導入したパラメー タの物理的意味が曖昧になる為、今後の試験結果を俯瞰的に眺めて適用方法を考える必要があ

る。なお、^{*σ*}*vmin*の符号の正負はモデルの構築上、区別する必要がないため、モデル化に対 する影響はない。

以上の様に、試験結果を踏まえ、二次鉱物が生成したケースに対応した力学挙動モデルの拡 張を提案した。今後、その他の二次鉱物での検証により、モデルの信頼性を向上させていく必 要性がある。

(4) 膨潤挙動

これまでの検討で、二次鉱物の種類が膨潤挙動に及ぼす影響は小さく、膨潤挙動はモンモリ ロナイト含有率が支配的であること、モンモリロナイトは膨潤によって塑性化することなどが 明らかとなっている。その一方で、モンモリロナイト含有率が同等なクニゲル V1 と人工ベン トナイト(モンモリロナイト含有率 59%)では大きな相違がないが、モンモリロナイト含有率 が小さいほど、荷重制御膨潤量試験の平衡値は完全飽和線よりも小さい値を示すことが分かっ た。さらに、モンモリロナイト含有率が高い場合でも、上載圧が小さく膨潤量が非常に大きい ケースでも、その平衡値は完全飽和線よりも大きい値を示すことが分かった。このような完全 飽和線と乖離するケースでは、モンモリロナイトの膨潤に対して非膨潤性随伴鉱物の土骨格構 造の応力履歴(膨潤時の随伴鉱物とモンモリロナイトの分離)が影響しているものと考えられ た。そのため、今年度の検討では、膨潤時の随伴鉱物とモンモリロナイトの分離)が影響しているものと考えられ た。そのため、これまでに実施してきた荷重制御膨潤量試験の上載圧の内、最も小さい 0.1MPaの上載圧を作用させて膨潤量試験を実施した。この際のパラメータは、モンモリロナ イト含有率であり、それぞれ、20、40、60、80wt%とした。また、試験前と試験後のモンモ リロナイト含有率を分布の違いを確認するために、各ケースとも同等の供試体を 2 個作成し、 一方は試験前に、他方は試験後にスライスしてモンモリロナイト含有率の変化を計測した。

その結果、膨潤量試験後では、モンモリロナイト含有率 20wt%のケースでは、密度分布に

大きな変化はなく、40wt%になると給水側のみが乾燥密度が小さく、モンモリロナイト含有率 が高い 60wt%や 80wt%では、膨潤によって全体的に乾燥密度が低下しながらも、給水側の方 が排水側よりも乾燥密度の低下割合が大きい傾向を示している。

モンモリロナイト含有率は、膨潤前後の乾燥密度の変化に比べて、ほとんど変化しないという 結果となった。このことは、モンモリロナイトの膨潤に伴って随伴鉱物も一体となって移動し ていることを意味している。

モンモリロナイトと随伴鉱物の分離が見られなかったため、完全飽和線(正規圧密線)と膨 潤線がモンモリロナイト含有率に応じてズレると考えることが自然である。この膨潤線と完全 飽和線はクニゲル V1 程度のモンモリロナイト含有率で一致していることから、両者のズレは、 モンモリロナイト含有率に対して線形ではなく、非線形であることが予想される。緩衝材の力 挙動のモデルの信頼性の向上のために、完全飽和線と膨張線のズレに関する、モンモリロナイ ト含有率に対する非線形について、今後取り扱いを検討していく必要性がある。

(5) せん断挙動

膨潤圧が有効応力としてせん断強度に寄与するかどうかを調べるために、微粉砕の有無だけが異なるモンモリロナイトとカオリンの一面せん断試験を実施した。その結果、両材料共に、未粉砕試料に比べ、微粉砕試料の方が給水時の膨潤圧が大きい結果となった。特に、微粉砕カオリンの方が微粉砕モンモリロナイトよりも膨潤圧が大きくなった。この拘束圧の違いを排除するために、初期拘束圧で無次元化した応力経路を描くと、カオリンは微粉砕の有無に依らず、ほぼ同一の応力経路となった。このことから、微粉砕による材料の変質などはなく、強度の違いは拘束圧の違いだと言える。一方、モンモリロナイトは、拘束圧で無次元化しても、微粉砕試料のせん断強度の方が未粉砕試料よりも大きい結果となった。このことは、モンモリロナイトの場合、拘束圧以外に、強度の増加に寄与するものが存在することを意味している。

モンモリロナイトの場合、別途実施されている微粉砕試料の微視的観察により、微粉砕によ り2次粒子の劈開していることが明らかとなっており、この劈開により水との接触面積が増加 し、膨潤圧が増加しているものと考えられる。この膨潤圧の増加により微粉砕試料の強度が増 加したものと考えられる。そのため、膨潤圧の幾らかは有効応力として作用していると考えら れる。

さらに、ベントナイトのせん断挙動を調べるために、含水比の異なる人工クニゲル V1 を飽 和まで一次元排気圧縮し、除荷することなく等体積一面せん断を行った。このため、高含水比 ケースは低密度で、低含水比ケースは高密度でせん断することになる。

限界状態理論に基づくと、正規圧密曲線と限界状態線はe-logP 平面において平行関係にあり、 多くの非膨潤性の粘性土の試験結果がこの理論に従うことが明らかとなっているのに対して、 ベントナイトの場合、せん断終了時の鉛直応力を乾燥密度と鉛直応力の平面にプロットすると、 その応力点を連ねた限界状態線は完全飽和線と平行関係にあることが分かる。このため、間隙 比と鉛直応力の平面においては、完全飽和線と限界状態線が平行関係にならないことが明らか となった。この実験事実は、間隙比(密度)が小さく(大きく)なるほど、膨潤曲線の勾配で ある膨潤指数κが小さくなる可能性を示している。また、限界状態応力比M やダイレイタンシ ー係数Dが間隙比(密度)に依存するという可能性もあることが分かった。

高密度のケースはピーク強度までは線形的に応力が増加し、ピーク強度後に残留状態に漸近 する傾向を示しているのに対して、低密度のケースはピーク強度までの応力増加も緩やかであ り、残留強度とピーク強度の差異も小さい結果となった。

両者のストレスパスを比較すると、形状が明確に異なり、パスの立ち上がり方から、高密度 のケースよりも低密度のケースにおいて負のダイレイタンシーが顕著である可能性がある。こ のことは、前述の e ~ ln p' 平面において限界状態線と正規圧密曲線は平行ではない理由として、 限界状態応力比 M やダイレイタンシー係数 D が間隙比(密度)に依存するという考察と整合す る。

以上の様に、緩衝材のせん断試験により、限界状態線に関する知見が得られ力学挙動のモデ ルの信頼性を向上させることが出来るものと考えられる。これまでの試験による緩衝材の限界 状態線に関するデータは少ないことから、特にこれまでよりも低密度側での試験データを取得 して検討することにより信頼性を向上させる必要性がある。

(6) 水理特性

変質後人工ベントナイトの水理挙動を調べる目的で透水試験を実施した。Case1とCase2の 透水係数は、それぞれ 1.79E-12m/s と 1.59E-12 m/s であった。前述の通水圧の差の分だけ、 透水係数に差が生じているが、概ね同等と言える。また、モンモリロナイト含有率と透水係数 の関係との比較から、変質後人工ベントナイトの透水係数は増加するが、その値は、モンモリ ロナイト含有率 29.5%の変質前の人工ベントナイトとほぼ同等であることが分かる。このこと から、モンモリロナイトが別の低土粒子密度の非膨潤性鉱物に変質しても、止水性能に関して は、モンモリロナイト含有率から推定可能であると言える。このことは、乾燥密度 1.6Mg/m³ 程度の状態であれば、モンモリロナイトがアナルサイム化することによる外間隙の減少の影響 は小さいことを意味する。さらに言えば、乾燥密度 1.6Mg/m³ 程度の状態のベントナイト系人 工バリアの止水性能は、その内間隙の止水性で決まり、外間隙の影響は小さいと言える。

さらに、水理モデルとして Kozeny-Carman 則を発展させて、内間隙と外間隙を区別した Kozeny-Carman 則の適用性を検討した。その結果、内間隙のみで透水係数を定義するか、外 間隙と内間隙のそれぞれで定義した透水係数の調和平均を取ったモデルの整合性が高いことを 示した。

3-58

3.3.1 試験の概要

通常、力学を考慮した地球化学・物質移行解析モデルでは、化学的な作用に速度場を仮定する と繰り返し収束計算に膨大な時間を要するために瞬時平衡に至るものとして取り扱う場合が多い。 しかしながら、実際には化学的な反応にはある速度が存在し、ある力学的・化学的に平衡な状態 (図 3.3.1-1、点 A)から化学的な外的作用が生じた場合(図 3.3.1-1、青矢印 A→B)には、あ る時間をかけて別の力学的・化学的平衡場(図 3.3.1-1、点 B)に至ると考えられる。図 3.3.1-1 の青矢印 A→B に示すように、平衡状態から別の平衡状態に至る過程は線形や非線形など様々な 可能性があり、実験的に確かめておく必要がある。さらに、力学的な変化や化学的な変化は、本 来、ある時間をかけて平衡状態に達するものであり、例えば、力学的なクリープ変形や化学的な 鉱物溶解などは少なくとも数年オーダーで試験を実施しなければ、有意なデータを取得すること が難しい。

そこで本検討では、前研究フェーズから、化学と力学の連成モデル試験を実施して、ある力 学・化学的平衡状態から別の平衡状態へ至る際の挙動を調べている。具体的には、非常に精緻に 力学試験を実施可能な超低ひずみ速度制御圧密試験機(図 3.3.1-2)と非常に精緻に透水試験を実 施可能なフローポンプ透水試験(図 3.3.1-3)を併用した試験機を用いて化学・力学連成モデル実 験を実施している。

本研究で使用する材料は、クニピア F (Na 型モンモリロナイト) と Ca 型化させたモンモリロ ナイトである。このように事前に化学的に変質した材料に対して力学試験を実施する方法は、力 学変化に対して化学的変質が瞬時に平衡状態に達すると見なせるか、力学変化の速度に対して化 学的な変質が非常に緩慢で平衡状態に見なせる場合に適用可能となる。本研究で対象にしている 変質のうち、瞬時に平衡状態に達する化学変質はモンモリロナイトの Ca 型化であり、非常に緩 慢な化学変質は鉱物の溶解である。

そこで、本研究では、

- Na 型ベントナイトの Ca 型化に伴う力学挙動変化の取得
- Na 型ベントナイトの溶解に伴う力学挙動変化の取得

を行うこととした。図 3.3.1-4には化学・力学連成モデル試験用セルとフローポンプ透水試験機 を示す。平成 26 年度は、Ca型化および溶解のケースの力学試験のデータを取得して挙動を検討 すると共に、一部の試験体を解体し化学的な変質状態に関する分析及びその化学解析を実施し、 力学モデル及び化学解析に反映事項及び課題を抽出した。



図 3.3.1-1 化学・力学連成モデル試験の意味



図 3.3.1-2 超低ひずみ速度制御圧密試験機の概略図



図 3.3.1-3 フローポンプ透水試験機の概略図



図 3.3.1-4 化学・力学連成モデル試験用セルとフローポンプ透水試験機

3.3.2 Na型ベントナイトのCa型化に伴う力学挙動変化に関する試験

(1) 試験計画

本試験では、圧縮した Na 型モンモリロナイトを拘束条件下のままで、フローポンプ透水試 験機(図 3.3.1-2)を用いて、CaCl2水溶液を通水して Ca 化させ、超低ひずみ速度制御圧密試 験機(図 3.3.1-3)を用いて、この際の締固め圧力と間隙比の関係を取得した。試験手順は、以 下の通りである。

- Ca型化モンモリロナイトとNa型モンモリロナイトを乾燥密度1.4 Mg/m³となるように圧縮して締固める。
- ・Ca型化モンモリロナイトとNa型モンモリロナイトの供試体を、体積一定条件で、0.3mol/lのCaCl2水溶液と蒸留水でそれぞれ飽和させ、その際の膨潤圧を計測する。
- ・膨潤圧が平衡に達したら、Ca型化モンモリロナイトの供試体は乾燥密度が 1.6 Mg/m³、 Na型モンモリロナイトの供試体は乾燥密度が 1.5Mg/m³となるように圧密する。この間、 間隙比の変化と締固め圧力の関係(e-lnP 関係)を、超低ひずみ速度制御圧密試験機によ り測定する。
- ・e-lnP 関係を取得したら、Na 型モンモリロナイトの供試体に対してイオン交換水を 0.3 mol/l のイオン強度に調整した CaCl₂ 水溶液に替え、圧力、または体積一定条件下でフローポンプ透水試験機により通水し、ベントナイト中の間隙水を Ca 置換させる。
- ・この際の間隙比の変化と圧力の変化を測定し、e-lnP 平面上で整理する。
- ・得られた結果をもとに、Na型ベントナイトが Ca型化する過程における e-lnP 関係を整理 する。
- ・また、上記 Ca 型化したベントナイトの e-lnP 関係の信頼性を評価するため、CaCl2 水溶液 に懸濁させた後に余分なイオンを洗浄することによって事前に準備した Ca 型化ベントナ イトを用いて乾燥密度 1.4 Mg/m³となるように圧縮して締固め、体積一定条件で 0.3 mol/l のイオン強度に調整した CaCl2 水溶液で飽和させる。
- ・この際の膨潤圧の変化(e-lnP 関係)を、超低ひずみ速度制御圧密試験機により測定し、 膨潤圧が平衡に達したら、乾燥密度 1.6 Mg/m 程度に圧密し e-lnP 関係を取得する。

- ・得られた事前に Ca 型化させたベントナイトの e-lnP 関係は、Na 型ベントナイト、Ca 型 化ベントナイトと比較すべく e-lnP 関係上にプロットして纏める。
- ・なお、本試験では、Na型ベントナイトとしてクニピアFを用い、Ca化ベントナイトについてもクニピアFを事前にCa化させた試料を用いる。

この手順を図 3.3.2-1を用いて説明すれば、Ca 型化による化学的変質が平衡状態に至る過程 を取得するために、蒸留水を間隙水としたクニピアFの圧密試験、およびイオン強度 0.3mol/l の CaCl₂水溶液を間隙水とした Ca 型化させたクニピア F の圧密試験を実施すると図 3.3.2-1 の青線と赤線で示す e-logP 関係が得られる。乾燥密度は 1.4 から 1.6Mg/m³程度である。次に 蒸留水を間隙水としたクニピア F を乾燥密度 1.4 から 1.5Mg/m³まで圧密すると、前述の青線 上を応力状態は変化する。ここで、荷重一定条件の下でフローポンプ透水試験を用いて間隙水 をイオン強度 0.3mol/l の CaCl₂水溶液に置換させると、応力状態は青線 A 点から赤線 B 点に 移行する。この際の応力変化(図 3.3.2-1、A 点から B 点)を取得し、平衡状態(図 3.3.2-1、 B 点)に達したら、乾燥密度 1.6Mg/m³程度まで再度圧密試験を行う。



図 3.3.2-1 Ca型化モデル試験イメージ図

さらに、この試験ケースだけでは、モデル実験とは言え、化学的な影響と力学的な影響を十 分に分離して考察することが難しいため、幾つかの試験を追加することとした。全ての試験ケ ースをまとめて表 3.3.2・1に示す。表 3.3.2・2には追加試験ケースの役割比較表を示す。各試 験で着目している事象を比較することで、特定の事象が化学/力学的な挙動に及ぼす影響を把 握できる。各試験の関連性については図 3.3.2・2、図 3.3.3・2に示す。図に示すように、これ らの追加検討によって、さまざまな化学、力学挙動の影響割合が明らかとなる。

表 3.3.2-1 Na型ベントナイトの Ca型化に伴う力学挙動変化の取得試験ケース

呼称	モンモリロナイト	間隙水	備考
CKPCa	Ca 型化クニピア F	CaCl2水溶液	終了
	乾燥密度 1.4 Mg/m ³ 程度	イオン強度 0.3mol/l 程度	
	⇒1.6 Mg/m ³ 程度		
KPCa	クニピア F	蒸留水⇒CaCl₂水溶液	※継続試験
	乾燥密度 1.4 Mg/m ³ 程度	イオン強度 0.3mol/l 程度	乾燥密度 1.5Mg/m ³ で液種を
	⇒1.5 Mg/m ³ 程度		CaCl ₂ 水溶液に置換中
			供試体高さ 20mm
KPCa-H	クニピア F	蒸留水	※継続試験
	乾燥密度 1.4 Mg/m ³ 程度		供試体高さ 5mm
	⇒1.5 Mg/m ³ 程度		クリープ挙動の把握
CKPCa-H	Ca 型化クニピア F	蒸留水	※継続試験
	乾燥密度 1.4 Mg/m ³ 程度		供試体高さ 5mm
	⇒1.5 Mg/m ³ 程度		クリープ挙動の把握
KPCa-N	クニピア F	蒸留水⇒NaCl 水溶液	※継続試験
	乾燥密度 1.4 Mg/m ³ 程度	イオン強度 0.3mol/l 程度	供試体高さ 5mm
	⇒1.5 Mg/m ³ 程度		イオン強度の影響把握

表 3.3.2-2 追加試験ケースの役割比較表

	Na 型	Ca 型	ケイ砂 有無	イオン 強度	鉱物 溶解	Ca 型化	圧密	クリーフ゜	レラクセ゛ーション
CKPCa		•		•			•		
KPCa	•			•		•			•
KPCa-H	•								•
CKPCa-H		•							•
KPCa-N	•			•					•



図 3.3.2-2 Na型モンモリロナイトの Ca型化に関する検討ケース

(2) 継続試験結果 (CKPCa、KPCa)

図 3.3.2-3、図 3.3.2-4に蒸留水による Na 型モンモリロナイトと CaCl₂水溶液による Ca 型 化モンモリロナイトの飽和時の膨潤圧の計測結果を示す。図から、蒸留水による Na 型モンモ リロナイトと CaCl₂水溶液による Ca 型化モンモリロナイトの膨潤圧はほぼ平衡状態にあると 考えられる。さらに、蒸留水による Na 型モンモリロナイトの膨潤圧に比べ CaCl₂水溶液によ る Ca 型化モンモリロナイトの膨潤圧の方が 2 倍弱大きいことが分かる。また、両者とも膨潤 圧が平衡状態に達していることから、ほぼ飽和したものと判断した。



図 3.3.2-3 Na型モンモリロナイトの蒸留水による飽和時の膨潤圧



図 3.3.2-4 Ca型モンモリロナイトの CaCl2 水溶液による飽和時の膨潤圧

さらに排水の採取を目的として、シリンジポンプで強制的に蒸留水を Na 型モンモリロナイトに通水させた。図 3.3.2-5に通水圧を示す。シリンジポンプで通水してすぐに排水が確認されたため、圧密試験を行った。



図 3.3.2-5 Na型モンモリロナイトの通水圧と通水量

図 3.3.2-6には、Na型モンモリロナイトに対して実施した圧密試験中の圧縮ひずみと圧密圧 カ、間隙水圧の関係を示す。本試験ではひずみ速度制御の圧密を行っているため、圧縮ひずみ を与えて、そのアウトプットが間隙水圧と圧密圧力になる。圧縮変位速度は初期に 0.333µm/min に設定し、その後 0.133µm/min、0.0667µm/min へと低下させながら試験を実 施した。変位速度の変化に伴って間隙水圧や圧密圧力の応答が変化していることがわかる。



図 3.3.2-6 Na型モンモリロナイトの定ひずみ速度圧密試験時刻歴

図 3.3.2-7には Na 型モンモリロナイトの間隙水に蒸留水を用いた圧密試験と、Ca 型モンモ リロナイトの間隙水に CaCl₂水溶液を用いた圧密試験から得られる乾燥密度と圧密圧力の関係 と間隙比と圧密圧力の関係(e-lnP 関係)を示す。 図からも明らかなように、Ca型モンモリロナイトの間隙水に CaCl₂水溶液を用いた圧密試 験から得られる e-lnP 関係よりも Na型モンモリロナイトの間隙水に蒸留水を用いた圧密試験 から得られる e-lnP 関係の方が e-lnP 空間で左側に存在している。これは、Na型モンモリロナ イトと Ca型モンモリロナイトを同じ密度に締め固める場合、Ca型モンモリロナイトの間隙水 に CaCl₂水溶液を用いた場合の方が、Na型モンモリロナイトの間隙水に蒸留水を用いた場合 よりも大きな載荷重を要することを意味している。

また、モンモリロナイトの圧密試験には非常に時間を要するために、Na 型モンモリロナイ トの間隙水に蒸留水を用いた圧密試験と、Ca 型モンモリロナイトの間隙水に CaCl₂ 水溶液を 用いた圧密試験はともに所定の乾燥密度(間隙比)に至っていないが、本試験の目的である力 学的、化学的に平衡状態にあるベントナイト系人工バリアが外的作用によって別の平衡状態に 達する間の挙動を実験によって取得するという目的に対して、Ca 型化させる乾燥密度はある 程度の大きさを満足していれば大きな意味を持たないため、乾燥密度 1.513Mg/m³ の時点で CaCl₂ 水溶液の通水を開始した。この際、供試体の体積変化が生じないように体積拘束条件を 課した。



図 3.3.2-7 Na 型モンモリロナイト(蒸留水)と Ca 型モンモリロナイト(CaCl₂)の e-lnP 関係

図 3.3.2-8に、Na型モンモリロナイトに CaCl₂水溶液を通水した場合の圧密圧力の変化を示 している。図から CaCl₂水溶液を通水中、圧密圧力が減少傾向を示している。これは、体積拘 束条件を課しているため供試体がクリープ挙動を示していること、間隙水のイオン強度が増加 した事による膨潤圧の低下、Ca型化による応力の変化が混在しているためと考えられる。図 3.3.2-9にはこの CaCl₂水溶液を通水した場合の圧密圧力の変化をpd-lnP関係に追記している。 図に示すように、CaCl₂水溶液を用いて取得した Ca型化モンモリロナイトの pd-lnP関係と逆 の方向に応力が向かっていることが分かる。このことから、クリープ挙動とイオン強度による 膨潤圧の低下が Ca型化による応力増加よりも影響が大きい可能性がある。本試験で発生して いる現象は、実際の処分場でも想定されることではあるが、これらの影響を分離するためには、 別途クリープ試験、間隙水のイオン強度の異なる圧密試験などを実施する必要がある。



図 3.3.2-8 CaCl2水溶液を通水した場合の圧密圧力の変化



図 3.3.2-9 ベントナイト系人工バリアの Ca 型化中の応力変化

図 3.3.2-10にベントナイト系人工バリアの Ca 型化中の応力変化と完全飽和線の比較を示す。 図からも明らかなように、本試験における Na 型モンモリロナイトの e-logP 関係は完全飽和線 の右側にあり、Ca 型化に従って完全飽和線に向かって応力が移動していることが分かる。また 前述のひずみ速度制御圧密試験によって得られた e-logP 関係はさらに右側にシフトしている。 同じ材料で正規圧密線は唯一 1 つしかないこと、完全飽和線と正規圧密線の等価性などに鑑み れば、これらの違いは試験中に発生した過剰間隙水圧の影響を十分に排除できずに有効応力の 中に過剰間隙水圧がいくらか含まれているものと考えられる。その大きさは、完全飽和線と正 規圧密線の等価性から、完全飽和線との差と考えるのが合理的である。また Ca 型化中の挙動 には、レラクゼーション挙動、間隙水のイオン強度の影響が含まれていると考えられる。



図 3.3.2-10 ベントナイト系人工バリアの Ca型化中の応力変化と完全飽和線の比較

ここで採取された排水を用いて陽イオン分析を行った。採取された排水の質量は 0.123g で ある。本試料を、イオンクロマトグラフに導入するため純水を用いて 12.7 倍に希釈した。分 析に用いた試料質量は約 1.57g である。分析した陽イオンは、ナトリウム(Na)、カリウム(K)、 マグネシウム (Mg)、カルシウム (Ca)、陰イオンは塩化物イオン、亜硝酸イオン、硝酸イ オン、硫酸イオンの合計 8 種とした。分析結果を表 3.3.2-3に示す。

ナトリウムイオンが高濃度に検出され、その濃度は 3660mg/ℓ であった。表 3.3.2-4に本検 討で使用している Na 型モンモリロナイトの交換性陽イオン分析結果[5]を示す。この Na 型モ ンモリロナイトの交換性陽イオン分析のうち、交換性 Na イオンが全てこの排水中に溶出した とすると、表 3.3.2-5に示すように、供試体全体の乾燥質量が 90.46g(φ60mm×h20mm× pd1.6Mg/m³)であるため、全間隙水が排水と同様の組成であるとすると全間隙水中の Na イオ ン 3.79meq は全体の 4.15%である。

測定結果	希釈溶液の 測定値(mg/l)	試料溶液中 の濃度(mg/l)
ナトリウムイオン	287.9	3660
カリウムイオン	1.2	15.2
カルシウムイオン	0.5	6.3
マグネシウムイオン	0.1 未満	1.3 未満
塩化物イオン	64.9	826
亜硝酸イオン	42.1	536
硝酸イオン	4.9	62.3
硫酸イオン	404.6	5150

表 3.3.2-3 Na 型モンモリロナイトからの排水を用いたイオン分析結果

表 3.3.2-4 本検討で使用している Na 型モンモリロナイトのからの排水を用いた イオン分析結果 [5]

計測項目 試料名	CEC meq/100g	交換性 Na meq/100g	交換性 Ca meq/100g	交換性 Mg meq/100g	交換性 K meq/100g	Ca 型化率 CR%
クニヒ [°] ア F	111	101	21.5	2.87	2.15	-51.836

表 3.3.2-5 本検討で使用している Na 型モンモリロナイトのからの排水中の Na イオン

ベントナイト 絶乾量	陽イオン 交換容量	排水中の Na イオン	全間隙水	全間隙水中の Na イオン	交換した Na イオン
(g)	(meq)	(meq/l)	(1)	(meq)	(%)
90.46	55.00	159.20	0.023	3.79	4.15

(3) 追加試験結果

以下に KPCa-H、CKPCa-H、KPCa-Nの試験結果を示す。

KPCa-H は、乾燥密度 1.4Mg/m³の Na 型モンモリロナイトに蒸留水を通水し、飽和させた後に 1.5Mg/m³まで圧密し、体積拘束条件で応力緩和させることによって、Na 型モンモリロナイトの圧密~レラクゼーション挙動を取得するものである。

CKPCa-Hは、乾燥密度 1.4Mg/m³の Ca型モンモリロナイトに蒸留水を通水し、飽和させた後に 1.5Mg/m³まで圧密し、体積拘束条件で応力緩和させることによって、Ca型モンモリロナイトの圧密~レラクゼーション挙動を取得するものである。

KPCa-N は、乾燥密度 1.4Mg/m³の Na 型モンモリロナイトに NaCl 水溶液を通水し、飽和 させた後に 1.5Mg/m³まで圧密し、体積拘束条件で応力緩和させることによって、Na 型モン モリロナイトの圧密~レラクゼーション挙動にイオン強度が及ぼす影響を Ca 型化の影響を排 除して取得するものである。

図 3.3.2-11に各試験の給水量の経時変化を示す。試験機のポーラスメタルや配管などのデッドスペースが飽和した後に供試体の飽和が始まり、各供試体ともに十分に飽和していることが分かる。なお、KPCa-Nのみ、通水開始から210日目で通水圧を0.1MPa作用させた。飽和度が100%に達した時点で載荷段階に移行した。

3-69



図 3.3.2-11 Na型モンモリロナイトへの給水状況

図 3.3.2-13及び図 3.3.2-13には、各試験の吸水時の膨潤圧の経時変化、及び継続試験とし て実施している KPCa の Ca 型化中の膨潤圧変化を併せて示す。飽和度が 100%になるにつれ て膨潤圧は平衡状態になっている。その後、段階載荷によって膨潤圧も載荷応力分だけ増加し ている。段階載荷は供試体の乾燥密度が 1.5Mg/m³になるまで行った(図 3.3.2-14参照)。載 荷圧力は 2.0、4.0、5.0、6.0MPa であり、乾燥密度が 1.5Mg/m³に達した時点で変形を拘束し、 レラクゼーション過程に移行した。図から、KPCa の Ca 型化中の膨潤圧に比ベレラクゼーシ ョン中の膨潤圧は大きめの値を示しているが、概ね全ての試験で整合する値を示している。レ ラクゼーションによって膨潤圧の値が低下して定常状態に達した時点で Ca 型化、レラクゼー ション、過剰間隙水圧、イオン強度などの影響を定量評価できるものと考えられる。



図 3.3.2-12 Na型モンモリロナイトの Ca型化に伴う膨潤圧変化(補正前、時間軸線形表示)



図 3.3.2-13 Na型モンモリロナイトの Ca型化に伴う膨潤圧変化(補正前、時間軸対数表示)



図 3.3.2-14 Na型モンモリロナイトの段階載荷による密度増加

図 3.3.2-15には、図 3.3.2-13に示した図のうち、供試体作製時の初期応力の差を補正して、 初期応力からの増分値としての膨潤圧の経時変化を示している。Ca 型化、レラクゼーション、 過剰間隙水圧、イオン強度などが膨潤圧に及ぼす影響を定量評価する場合、初期応力の差を排 除する必要がある。図から、Ca 型化クニピアに蒸留水を通水したケース以外は概ね、平衡状 態に達したと考えられる(CKPCa-H)。



図 3.3.2-15 Na型モンモリロナイトの Ca型化に伴う膨潤圧変化(補正後)

図 3.3.2-16に図 3.3.2-15に示した初期応力からの増分値としての膨潤圧の経時変化の差か ら、Ca型化、レラクゼーション、過剰間隙水圧、イオン強度などが膨潤圧に及ぼす影響を定 量評価した結果を示す。KPCa、CKPCaは共に定ひずみ速度圧密試験結果であり、KPCaは乾 燥密度 1.4~1.5Mg/m³、CKPCa は乾燥密度 1.4~1.6g/m³まで圧密した試験である。一方、 KPCa-H、CKPCa-H、KPCa-Nは乾燥密度 1.5Mg/m³で、体積拘束条件で試験をしている。そ のため、両者を比較するために、KPCaで乾燥密度がほぼ 1.5Mg/m³で CaCl₂水溶液を給水し ている過程の圧密圧力の変化と CKPCa で乾燥密度 1.5Mg/m³の値を示している。


図 3.3.2-16 Na型モンモリロナイトの Ca型化に伴う種々の影響

図から、各試験結果を比較して、膨潤圧に及ぼす影響を表にまとめると表 3.3.2-6のように なる。KPCaの膨潤圧の最終値にNaイオンからCaイオンへの層間陽イオンの変化、リラクゼ ーションによる応力減少、さらに過剰間隙水圧を補正した。なお、CKPCa では CaCl2 水溶液 を使用しているため、イオン強度の補正はしていないが、過剰間隙水圧のみの補正値を算出す る際にイオン強度の補正値を使用した。

	要因	応力
		(MPa)
KPCa の試験後の膨潤圧		4.04
	イオン強度(H₂O→NaCl)	(0.303)
	層間陽イオン(Na→Ca)	+0.480
	リラクゼーション+摩擦(1100 日程度)	+0.215
	過剰間隙水圧	+2.919
Ca 型化後の補正した膨潤圧		7.65
CKPCa の e-logP 関係から		7.93
得られる膨潤圧		

表 3.3.2-6 KPCaの膨潤圧の補正要因と補正後の値

この結果を図示すると、図 3.3.2-17のようになる。図では補正後の Ca 型化過程の乾燥密度 を見易くするためにずらして示している。図からも明らかなように、種々の要因を補正すると、 Na 型モンモリロナイトの膨潤圧が Ca 型化によって、Ca 型化モンモリロナイトの e-logP 関係 に漸近することが分かる。ただし、これらの補正要因は、Ca 型化する過程で変化するため、 最終値のみを補正していることに注意が必要である。時々刻々と Ca 型化する過程を取得する ためには、各要因の経時変化をモデル化する必要がある。



図 3.3.2-17 ベントナイト系人工バリアの Ca型化中の応力変化

(4) 供試体の解体

前述の Ca 型化の試験終了後、表 3.3.2-1に示す KPCa、KPCa-H、CKPCa-H、KPCa-N の 解体を行った。解体手順は以下の通りである。

◇準備

①ゴム手袋を着用(汗の Na や K などが分析の妨げになる)

◇排水の回収

②排水の採水瓶を取り外す

③給・排水経路にある液体を、細管を用いて注射器で吸引回収する

④バットの中でセルを解体し、バット内に漏れた液体も回収する

◇セルの解体

⑤解体したセルのポーラスメタル、メンブレンフィルタをセットで、給水側と排水側で 分けてシャーレに入れてパラフィンシートで密封。

◇供試体のスライス

⑥セルをスライサーにセットし、押し出した量、押し出された量を計測。⑦超音波カッターで下記の厚さでスライスする。

- 供試体高さ 5mmの供試体は 0.5mm×6 枚にスライスし、残試料の厚さ(2 mm程度)
 を計測し、遠沈管に全て分けて入れる。
- 供試体高さ 20mm の供試体は 0.5mm×12 枚、1mm×12 枚にスライスし、残試料の厚さ(2mm 程度)を計測し、遠沈管に全て分けて入れる。

⑧スライスした試料は風袋引きした遠沈管に入れて湿潤質量を計測する。

⑨スライス時にカッターの刃にこびり付いた試料は回収し質量を測るが、本体試料と混合せずに保管。

試験の状況写真を図 3.3.2-18に示す。供試体のスライスには、超音波カッターを用いてシー ト状に試料が採取できるように工夫した。

表 3.3.2-7に Ca 型化試験供試体の解体結果を示す。KPCa-H、CKPCa-H、KPCa において給 水側の第1層目の厚さが計画よりも大きくなったものの、概ね良好に解体できた。図 3.3.2-19 には解体時の湿潤密度分布を示す。解体に伴う乱れの影響で、給排水面の近傍の密度が低下傾 向であるが概ね均一な供試体で試験を実施できたことが分かる。



図 3.3.2-18 Ca型化試験の解体状況

			-						
CASE	脱型時	}供試体	No	押出し厚さ	試料質量	清掃屑	湿潤密度	給水面からの	#≠ =⊐
CASE	質量(g)	厚さ(mm)	100.	(mm)	(g)	質量(g)	(g)	平均距離(mm)	17 0
KPCa-N	-	5.142	No.5 KPCa-N-01	0.502	1.846	0.006	1.301	0.251	
			No.5 KPCa-N-02	0.501	2.456	0.006	1.734	0.753	
			No.5 KPCa-N-03	0.500	2.552	0.014	1.805	1.253	
			No.5 KPCa-N-04	0.500	2.664	0.014	1.884	1.753	
			No.5 KPCa-N-05	0.500	2.665	0.014	1.885	2.253	
			No.5 KPCa-N-06	0.500	2.657	0.003	1.879	2.753	
			No.5 KPCa-N-07	2.253	10.896	-	1.711	4.129	
KPCa-H	26.15	4.900	No.3 KPCa-H-01	0.950	4.610	0.028	1.716	0.475	スライス片実測
			No 3 KPCa-H-02	0.501	2 675	0.010	1 888	1 201	
			No 3 KPCa-H-03	0.501	2 649	0.005	1.870	1 702	
			No 3 KPCa-H-04	0.501	2.010	0.004	1 910	2 203	
			No 3 KPCa-H-05	0.501	2.665	0.004	1.885	2.203	
			No.3 KPCa-H-06	0.500	2.005	0.012	1.855	3 204	
			No.3 KPCa-H-07	1 338	6.977	0.003	1.845	4 193	
CKPCa-H	26.78	4.933	No.4 CKPCa-H-01	0.740	3.554	0.019	1.699	0.370	スライス片実測
			No.4 CKPCa·H·02	0.500	2.593	0.011	1.834	0.990	
			No.4 CKPCa-H-03	0.504	2.606	0.011	1.829	1.492	
			No.4 CKPCa-H-04	0.500	2.594	0.006	1.835	1.994	
			No.4 CKPCa·H·05	0.501	2.631	0.014	1.857	2.495	
			No.4 CKPCa-H-06	0.500	2.585	0.008	1.829	2.995	
			No.4 CKPCa-H-07	1.605	8.866	0.030	1.954	4.048	
KPCa	105.46	19.788	No.2 KPCa-05-01	0.830	3.927	0.015	1.673	0.415	スライス片実測
			No.2 KPCa-05-02	0.505	2.519	0.009	1.764	1.083	
			No.2 KPCa-05-03	0.500	2.656	0.009	1.879	1.585	
			No.2 KPCa-05-04	0.500	2.676	0.009	1.893	2.085	
			No.2 KPCa-05-05	0.508	2.808	0.011	1.955	2.589	
			No.2 KPCa-05-06	0.500	2.587	0.010	1.830	3.093	
			No.2 KPCa-05-07	0.502	2.627	0.011	1.851	3.594	
			No.2 KPCa-05-08	0.500	2.613	0.008	1.848	4.095	
			No.2 KPCa-05-09	0.500	2.653	0.009	1.877	4.595	
			No.2 KPCa-05-10	0.500	2.648	0.006	1.873	5.095	
			No.2 KPCa-05-11	0.500	2.596	0.006	1.836	5.595	
			No.2 KPCa-05-12	0.500	2.639	0.007	1.867	6.095	
			No.2 KPCa-10-01	1.001	5.283	0.030	1.867	6.846	ここから 1mm 切断面が 0.5mm スライス時 より乾燥 切断抵抗増大
			No.2 KPCa-10-02	1.000	5.216	0.025	1.845	7.846	
			No.2 KPCa-10-03	1.000	5.259	0.021	1.860	8.846	
			No.2 KPCa-10-04	1.000	5.197	0.019	1.838	9.846	
			No.2 KPCa-10-05	1.000	4.872	0.046	1.723	10.846	操作ミス再設置
			No.2 KPCa-10-06	1.001	5.305	0.026	1.874	11.847	
			No.2 KPCa-10-07	1.000	5.273	0.036	1.865	12.847	
			No.2 KPCa-10-08	1.001	5.242	0.023	1.852	13.848	
			No.2 KPCa-10-09	1.000	5.205	0.022	1.841	14.848	
			No.2 KPCa-10-10	0.999	5.101	0.023	1.806	15.848	
			No.2 KPCa-10-11	1.000	5.144	0.022	1.819	16.847	
			No.2 KPCa-10-12	1.000	5.245	0.049	1.855	17.847	供試体浮き上がり 押えながらスライス
			No.2 KPCa-最終 層	1.335	4.701	0.002	1.245	19.015	

表 3.3.2-7 Ca型化試験供試体の解体結果





(5) Na 型ベントナイトの Ca 型化による力学挙動のまとめ

Na型ベントナイト系人工バリアの e-logP 関係が完全飽和線の右側に存在し、Ca型化中の応 力変化は完全飽和線に向かって移動する挙動は、試験中に発生した過剰間隙水圧の影響を十分 に排除できずに有効応力の中に過剰間隙水圧が含まれているものと考えられる。その大きさは、 完全飽和線と正規圧密線の等価性から、完全飽和線との差と考えるのが合理的である。また Ca 型化中の挙動には、レラクゼーション挙動、間隙水のイオン強度の影響が含まれていると考え られる。

図 3.3.2-16に図 3.3.2-15に示した初期応力からの増分値としての膨潤圧の経時変化の差から、Ca型化、レラクゼーション、過剰間隙水圧、イオン強度などが膨潤圧に及ぼす影響を 定量評価した。これにより、Ca型化における応力の変化を補正出来ることを示した。

さらに、試験後の供試体を解体するに際して、超音波カッターでスライスして密度分布を調 べ、化学分析に供した。

3.3.3 Na型ベントナイトの溶解に伴う力学挙動変化に関する試験

(1) 試験計画

本試験では、圧縮した Na 型ベントナイトを拘束下で、フローポンプ透水試験機を用いて NaOH 水溶液を通水し、この際の締固め圧力と間隙比の関係を超定ひずみ速度制御圧密試験機 を用いて取得し、鉱物溶解という化学的な変化によって力学的平衡状態がどのように遷移する かを評価した。試験手順は、以下の通りである。

- ・Na型モンモリロナイトを乾燥密度 1.6 g/cm³となるように圧縮して締固める。
- ・高圧一定条件下で、フローポンプ透水試験機により pH を 13 程度に調整した NaOH 水溶 液を通水する。
- ・この際の間隙比の変化と締固め圧力の関係 (e-lnP 関係) を測定する(図中 A→B)。測定は、
 e-lnP 関係が平衡に達するまで行う。圧縮ベントナイト中を通過した溶液は採取し、ベントナイトの溶解挙動を評価するための化学分析を行う。
- ・また、間隙比の遷移過程とモンモリロナイトの含有率の関係を考察するため、ケイ砂を混合した Na 型モンモリロナイトを乾燥密度 1.6 g/cm³となるように圧縮して締固め、pH を 13 程度に調整した NaOH 水溶液を通水し、この際の間隙比の変化と締固め圧力の関係 (e-lnP 関係)を測定するとともに、ケイ砂混合モンモリロナイト(人工ベントナイト) 中を通過した溶液を採取して化学分析を行う。
- ・得られた結果をもとに、e-lnP 関係と圧縮ベントナイトのモンモリロナイト含有率ならび に溶解量の関係を整理する。

この手順を図 3.3.3-1を用いて説明すれば、間隙水に NaOH 水溶液を用いて pH13 程度に調整したクニピア F を乾燥密度 1.6Mg/m³まで圧密し、高圧一定条件下でフローポンプ透水試験 機によって NaOH 水溶液を通水し続ける。この際の圧力の減少状況(図 3.3.3-1、A 点から B 点)を取得する。また、この間隙が減少した応力点(図 3.3.3-1 B 点)を通る間隙水に NaOH 水溶液を用いて pH13 程度に調整したケイ砂含有クニピア F の e-lnp'関係を取得し、ケイ砂含 有率(モンモリロナイト含有率)とモンモリロナイトの溶解量の関係性などを検討する。



図 3.3.3-1 モンモリロナイト溶解試験イメージ図

ただし、この試験ケースだけでは、モデル実験とは言え、化学的な影響と力学的な影響を十 分に分離して考察することが難しいため、幾つかの試験を追加することとした。全ての試験ケ ースをまとめて表 3.3.3・1に示す。表 3.3.3・2には H23 年度の試験ケースの役割比較表を示す。 各試験で着目している事象を比較することで、特定の事象が化学/力学的な挙動に及ぼす影響 を把握できる。各試験の関連性については図 3.3.3・2に示す。図に示すように、これらの追加 検討によって、さまざまな化学、力学挙動の影響割合が明らかとなる。

なお、本試験に関して、契約の期間内において e-lnP 関係が平衡に達しない場合、試験の継 続性を検討するものとして表 3.3.3-2に示す化学・力学連成モデル試験ケースを実施してい る。

呼称	モンモリロナイト	間隙水	備考
KPDS-1	ケイ砂含有クニピア F	NaOH 水溶液	終了
		pH13 程度	
KPDS-2	クニピア F	NaOH 水溶液	※継続試験
	乾燥密度 1.6Mg/m ³ 程度	pH13 程度	NaOH 水溶液を通水中
			供試体高さ 20mm
KPDS-3	クニピア F	NaOH 水溶液	※継続試験
	乾燥密度 1.6Mg/m ³ 程度	pH13 程度	供試体高さ 5mm
KPDS-HP1	クニピア F	NaOH 水溶液	※継続試験
	乾燥密度 1.6Mg/m ³ 程度	pH13 程度	供試体高さ 5mm
		超高圧、高通水圧	
KPDS-HP2	クニピア F	NaCl 水溶液	※継続試験
	乾燥密度 1.6Mg/m ³ 程度	0.1mol/l 程度	供試体高さ 5mm
		超高圧、高通水圧	
KPDS-H	クニピア F	蒸留水	※継続試験
	乾燥密度 1.6Mg/m ³ 程度		供試体高さ 5mm
KPDS-N01	クニピア F	NaCl 水溶液	※継続試験
	乾燥密度 1.6Mg/m ³ 程度	0.1mol/l 程度	供試体高さ 5mm
KPDS-Nl	クニピア F	NaCl 水溶液	※継続試験
	乾燥密度 1.6Mg/m ³ 程度	1.0mol/l 程度	供試体高さ 5mm

表 3.3.3-1 Na 型ベントナイトの溶解に伴う力学挙動変化の取	.得試験ケース
------------------------------------	---------

表 3.3.3-2 Na型ベントナイトの溶解に伴う力学挙動変化の取得試験ケースの役割比較表

	Na 型	Ca 型	ケイ砂 有無	イオン 強度	鉱物 溶解	Ca 型化	圧密	クリーフ゜	レラクセ゛ーション
KPDS-1	•		•	•	•				•
KPDS-2	•			•	•				•
KPDS-3	•			•	•				•
KPDS-HP1	•			٠	•			•	
KPDS-HP2	•			•	•			•	
KPDS-H	•								•
KPDS-N01	•			•					•
KPDS-N1	٠			٠					•



図 3.3.3-2 Na型モンモリロナイトの溶解に関する検討ケース

(2) 継続試験結果(KPDS-1、KPDS-2)

図 3.3.3・3に NaOH 水溶液による飽和過程における膨潤圧の計測結果を示す。図には、乾燥 密度 1.6Mg/m3の Na 型モンモリロナイトと図 3.3.2・3に示した蒸留水による Na 型モンモリロ ナイトの飽和時の膨潤圧と比較するために、乾燥密度 1.4Mg/m³の Na 型モンモリロナイトの 膨潤圧の経時変化を示している。

図から、両ケースともに膨潤圧はほぼ平衡状態にあると考えられる。図 3.3.2-3に示した蒸 留水による Na 型モンモリロナイトの飽和時の膨潤圧の計測結果と乾燥密度 1.4Mg/m3 の Na 型モンモリロナイトの膨潤圧の経時変化を比較すると、平衡膨潤圧がほぼ同じ値であり、本試 験期間程度の時間内であれば、高 pH がモンモリロナイトの膨潤圧に及ぼす影響は小さいと言 える。



図 3.3.3-3 Na型モンモリロナイトの NaOH 水溶液による飽和時の膨潤圧

さらに、図 3.3.3-4には、ケイ砂 30%混合 Na 型モンモリロナイトの NaOH 水溶液による飽 和時の膨潤圧を示している。



図 3.3.3-4 ケイ砂 30%混合 Na 型モンモリロナイトの NaOH 水溶液による飽和時の膨潤圧

さらに排水の採取を目的として、シリンジポンプで強制的に NaOH 水溶液を乾燥密度 1.6Mg/m³の Na 型モンモリロナイトに通水させた。図 3.3.3-5に通水圧と通水量の経時変化を 示す。シリンジポンプで通水してすぐに排液が確認されたため、飽和しているものと判断して 溶解試験を行った。図 3.3.3-6に乾燥密度 1.6Mg/m³で体積拘束した条件で NaOH 水溶液を通 水した場合の膨潤圧の経時変化を示す。図に示すように、NaOH 水溶液を通水するに従って膨 潤圧が漸減していたが、漸減傾向はほぼ収束した様に考えられる。



図 3.3.3-5 Na型モンモリロナイトの NaOH 水溶液による飽和時の通水圧と通水量



図 3.3.3-6 Na型モンモリロナイトの NaOH 水溶液による飽和時の膨潤圧の変化

図 3.3.3-7に乾燥密度 1.6Mg/m³の Na 型モンモリロナイトと乾燥密度 1.4Mg/m³の Na 型モ ンモリロナイトの平衡膨潤圧を示す。図には、乾燥密度 1.6Mg/m³のケイ砂 30%混合 Na 型モ ンモリロナイトの平衡膨潤圧も示している。

図から、ケイ砂 30%混合 Na 型モンモリロナイトの平衡膨潤圧は乾燥密度 1.6Mg/m³の Na 型モンモリロナイトと燥密度 1.4Mg/m³の Na 型モンモリロナイトの平衡膨潤圧を結ぶ線の下 側に存在している。今後もシリンジポンプによって高 pH の NaOH 水溶液を通水し続ければ、 モンモリロナイトの溶解と沈殿が生じ、ほぼ乾燥密度 1.6Mg/m³を保ちつつ平衡膨潤圧がケイ 砂 30%混合 Na 型モンモリロナイトの平衡膨潤圧に近づく傾向を示すと考えられる。

図に示すように、乾燥密度 1.6Mg/m³の Na 型モンモリロナイトの溶解が定常状態に達して おらず、今後も継続して試験を実施する必要があるが、小林ら[1]によれば、平衡膨潤圧線は 完全飽和線や正規圧密線と等価であり、この試験結果の位置関係から、モンモリロナイトの含 有率の変化による力学挙動が推定できる。



図 3.3.3-7 Na型モンモリロナイトの NaOH 水溶液による飽和時の平衡膨潤圧

図 3.3.3-8には、図 3.3.3-7に本試験結果によるモンモリロナイト溶解のモデル化イメージ を合わせたものを示す。図に示すように、モンモリロナイト 100%の材料が乾燥密度一定で高 pH 水溶液を通水されモンモリロナイトが溶解して平衡膨潤圧が低下したとする。モンモリロ ナイトが 30%溶解した場合の平衡膨潤圧が乾燥密度 1.6Mg/m³のケイ砂 30%混合 Na 型モンモ リロナイトの平衡膨潤圧と同等であることが確認できれば、モンモリロナイトの溶解はモンモ リロナイト含有率の変化として取り扱える可能性がある。



図 3.3.3-8 本試験結果によるモンモリロナイト溶解のモデル化イメージ

そこで、今後、試験を継続し、モンモリロナイト 100%の平衡膨潤圧が低下して乾燥密度 1.6Mg/m³のケイ砂 30%混合 Na型モンモリロナイトの平衡膨潤圧と一致した場合の排液を採取 して溶解物質を調べれば、モンモリロナイトの溶解量とモンモリロナイト含有率をモデル化で きるため、HMC 連成解析にも資する情報となり得る。

ここで採取された排水を用いて陽イオン分析を行った。採取された排水の質量は 0.175g で ある。本試料を、ICP-質量分析計に導入するため純水を用いて 140 倍に希釈した。分析に用 いた試料質量は約 24g である。分析した陽イオンは、シリカ(Si)、ナトリウム(Na)、カリ ウム(K)、マグネシウム(Mg)、カルシウム(Ca)、の合計 5 種とした。分析結果を表 3.3.3-3 に示す。ケイ素イオンが高濃度に検出され、その濃度は 72.5mg/L であった。

ここで、モンモリロナイトの鉱物組成割合 *Na*_{0.33}*Mg*_{0.33}*Al*_{1.67}*Si*₄*O*₁₀(*OH*)₂ が常に保たれていると して、排水のシリカ量から溶解したモンモリロナイト量を算出すると、全間隙水の量が 0.02L であることから、1.67mg のシリカが溶解した事になる。この量は、1mol 当たりのシリカの量 に対して、0.22mmol に相当する。よって、0.08g のモンモリロナイトが溶解した事になり、 これは全モンモリロナイトに対して 0.09%に相当する。

3-83

表 3.3.3-3 ICP-質量分析計イオン分析結果

試料名	NaOH 通水ケースの排水					
測定結果	希釈溶液の 測定値(mg/l)	試料溶液中 の濃度(mg/l)				
ケイ素	0.52	72.5				
ナトリウムイオン	86.6	12100				
カリウムイオン	0.7	97.6				
カルシウムイオン	0.1	13.9				
マグネシウムイオン	0.1 未満	14 未満				

(3) 追加試験結果

以下に、試験ケース KPDS-3、KPDS-HP1、KPDS-HP2、KPDS-H、KPDS-N01、 KPDS-N1、KPDS-NO3の結果を示す。

KPDS-3 は、乾燥密度 1.6Mg/m³ に圧縮した Na 型モンモリロナイトを体積拘束条件下で pH13 の NaOH 水溶液を通水しながら応力緩和させることによって、Na 型モンモリロナイト の圧密~レラクゼーション挙動にモンモリロナイトの溶解とイオン強度が及ぼす影響を Ca 型 化の影響を排除して取得するものである。

KPDS-HP1 は、乾燥密度 1.6Mg/m³に圧縮した Na 型モンモリロナイトを 10MPa の荷重一 定条件下で pH13の NaOH 水溶液を 1MPa で通水しながらクリープ変形させることによって、 Na 型モンモリロナイトの圧密~クリープ挙動にモンモリロナイトの溶解とイオン強度が及ぼ す影響を Ca 型化の影響を排除して取得するものである。

KPDS-HP2 は、乾燥密度 1.6Mg/m³に圧縮した Na 型モンモリロナイトを 10MPa の荷重一 定条件下で NaCl 水溶液を 1MPa で通水しながらクリープ変形させることによって、Na 型モ ンモリロナイトの圧密~クリープ挙動にイオン強度が及ぼす影響を Ca 型化、鉱物溶解の影響 を排除して取得するものである。

KPDS-H は、乾燥密度 1.6Mg/m³に圧縮した Na 型モンモリロナイトを体積一定条件下で蒸 留水水溶液を通水しながら応力緩和させることによって、Na 型モンモリロナイトのレラクゼ ーション挙動を取得するものである。

KPDS-N01 は、乾燥密度 1.6Mg/m³に圧縮した Na 型モンモリロナイトを体積一定条件下で NaCl 水溶液(イオン強度 0.1)を通水しながら応力緩和させることによって、Na 型モンモリロ ナイトのレラクゼーション挙動に対するイオン強度の影響を陽イオン交換反応の影響を排除し て取得するものである。

KPDS-N1 は、乾燥密度 1.6Mg/m³に圧縮した Na 型モンモリロナイトを体積一定条件下で NaCl 水溶液(イオン強度 1.0)を通水しながら応力緩和させることによって、Na 型モンモリロ ナイトのレラクゼーション挙動に対するイオン強度の影響を陽イオン交換反応の影響を排除し て取得するものである。

KPDS-NO3は、乾燥密度 1.6Mg/m³に圧縮した Na 型モンモリロナイトを体積一定条件下で NaNO₃水溶液(イオン強度 0.1)を通水しながら応力緩和させることによって、Na型モンモリロ ナイトのレラクゼーション挙動に対する陰イオンの種類の影響を取得するものである。

図 3.3.3-9に Na 型モンモリロナイトの NaOH 水溶液給水量の経時変化を、さらに図 3.3.3-10には給水に伴う飽和度変化を示す。図に示すように、KPDS-HP1、KPDS-HP2 は飽 和度を高める必要があったため、両ケースに限って通水開始から 215 日目に通水圧を 0.1MPa を作用させた。その結果、給水量が増加し、全てのケースで飽和度が 100%に達した。



図 3.3.3-9 Na型モンモリロナイトの NaOH 水溶液給水量の経時変化



図 3.3.3-10 Na型モンモリロナイトの給水中の飽和度の経時変化

図 3.3.3-11に NaOH 水溶液給水時の Na 型モンモリロナイトの膨潤圧の経時変化を示す。図 から KPDS-H(蒸留水)と KPDS-N01(0.1mol/L の NaCl 水溶液)の膨潤圧がほぼ同等である。 またイオン強度が 0.1mol/L である KPDS-3(NaOH 水溶液)、KPDS-N01(0.1mol/L の NaCl 水 溶液)、KPDS-NO3(0.1mol/LのNaNO3水溶液)の平衡膨潤圧が異なる。これは、通水開始前の 初期応力状態が異なるために、各影響因子が膨潤圧に及ぼす影響に初期応力状態の差異が含ま れているためである。そこで、図 3.3.3-11に示した NaOH 水溶液給水時の Na型モンモリロナ イトの膨潤圧の経時変化から初期応力状態の影響を除去して、初期応力状態からの増分値とし ての膨潤圧の経時変化をまとめると図 3.3.3-12のようになる。



図 3.3.3-11 給水時の Na 型モンモリロナイトの膨潤圧の経時変化(補正前)



図 3.3.3-12 給水時の Na 型モンモリロナイトの膨潤圧の経時変化(補正後)

図 3.3.3-13に Na 型モンモリロナイトの溶解に伴う種々の影響を示す。KPDS-1 は乾燥密度 1.4Mg/m³であるため、比較からは除外した。また KPDS-HP1,-HP2 に関しても、荷重制御で あるため比較から除外した。

KPDS-2 は乾燥密度 1.6Mg/m³で供試体高さが 20mm である。一方、KPDS-3、KPDS-H、 KPDS-N01、KPDS-N1 は乾燥密度 1.6Mg/m³で供試体高さ 5mm である。KPDS-2 と KPDS-3 は pH13 の NaOH 水溶液、KPDS-H は蒸留水、KPDS-N01、KPDS-N1 はそれぞれ 0.1、 1.0mol/I の水溶液を用いている。 KPDS-2 と KPDS-3 の比較から、両者はほぼ同等に膨潤圧に至っていることが分かる。両者 の相違点は、供試体高さだけであり、その影響は供試体とセルの摩擦のみと考えられるため、 KPDS-2の試験結果に対する摩擦の影響は小さいと言える。KPDS-3 と KPDS-H の比較から、 間隙水のイオン強度(pH13 の NaOH 水溶液、0.1mol/l)の影響が 1.0MPa 程度であることが 分かる。また、KPDS-H と KPDS-N01 の比較から、間隙水の陰イオンの違いによる影響が 0.5MPa 程度であることが分かる。さらに、KPDS-N01 と KPDS-N1 の比較から、イオン強度 の違いにより 1.5MPa 程度の差が生じることが分かる。KPDS-H、KPDS-N01 と KPDS-N1 の 比較から、イオン強度が 0 から 0.1 になった場合の影響は 0.5MPa 程度の影響であるのに対し て、0.1~1.0 になった場合の影響は 1.5MPa と急激に大きくなることが分かる。



図 3.3.3-13 Na型モンモリロナイトの溶解に伴う種々の影響

図 3.3.3·14には、KPDS·HP1 と KPDS·HP2 のクリープ挙動を示している。KPDS·HP1 で は、乾燥密度 1.6Mg/m³ に圧縮した Na 型モンモリロナイトを 10MPa の荷重一定条件下で pH13 の NaOH 水溶液を 1MPa で通水しながらクリープ変形させることによって、Na 型モン モリロナイトの圧密~クリープ挙動にモンモリロナイトの溶解とイオン強度が及ぼす影響を、 KPDS·HP2 では、乾燥密度 1.6Mg/m³ に圧縮した Na 型モンモリロナイトを 10MPa の荷重一 定条件下で NaCl 水溶液を 1MPa で通水しながらクリープ変形させることによって、Na 型モ ンモリロナイトの圧密~クリープ挙動に鉱物溶解が及ぼす影響を、イオン強度の影響を排除し て調べることが可能である。また、KPDS·HP1 と KPDS·HP2 を比較することによって、陰イ オンが Na 型モンモリロナイトの圧密~クリープ挙動に及ぼす影響を調べることができる。図 から、KPDS·HP2 に比べ KPDS·HP1 の方が、沈下量が有意に大きく、Na 型モンモリロナイ トの圧密~クリープ挙動に対して陰イオンが及ぼす影響が有意であることが分かる。



図 3.3.3-14 高アルカリ環境下におけるクリープ挙動の変化

(4) 供試体の解体

前述のモンモリロナイト溶解試験のうち、表 3.3.3-1に示す KPDS-HP1 と KPDS-HP2 の解 体を行った。解体手順は3.3.2 (4) で示したもとの同様である。

試験の状況写真を図 3.3.3-15に示す。供試体のスライスには、超音波カッターを用いてシート状に試料が採取できるように工夫した。表 3.3.3-4に KPDS-HP1,KPDS-HP2 の解体結果を示す。表に示す通り、概ね良好に解体できた。しかしながら、NaOH 水溶液を用いた HP1 のケースは供試体が固く、スライスが難しかった。図 3.3.3-16には解体時の湿潤密度分布を示す。 解体に伴う乱れの影響で、密度分布が見られるが、給水側で密度低下が著しい傾向にある。



図 3.3.3-15 KPDS-HP1,KPDS-HP2の解体状況

	脱型時	供試体	NY.	押出し厚さ	試料質量	清掃屑	湿潤密度	給水面から の	44 27
case	質量 (g)	厚さ (mm)	No.	(mm)	(g)	質量 (g)	(g)	平均距離 (mm)	符記
No.10 KPDS-HP2	27.11	5.126	No.10 KPDS-HP2-01	0.501	1.985	0.008	1.401	0.251	
			No.10 KPDS-HP2-02	0.502	2.554	0.017	1.799	0.752	
			No.10 KPDS-HP2-03	0.500	2.620	0.020	1.853	1.253	
			No.10 KPDS-HP2-04	0.500	2.686	0.037	1.900	1.753	
			No.10 KPDS-HP2-05	0.499	1.988	0.117	1.409	2.253	前層より乾燥 粉じん多し
			No.10 KPDS-HP2-06	0.251	1.213	0.055	1.709	2.628	明らかに乾燥 ブレード逃げ確認、 デプスゲージで実測
			No.10 KPDS-HP2-07	2.365	11.922	0.011	1.783	3.936	
No.9 KPDS-HP1	27.55	5.225	No.9 KPDS-HP1-01	0.500	1.693	0.009	1.198	0.250	
			No.9 KPDS-HP1-02	0.500	2.671	0.009	1.889	0.750	
			No.9 KPDS-HP1-03	0.301	1.218	0.085	1.431	1.151	リング滑り ブレード加熱変色 水分蒸散多いと考えられる
			No.9 KPDS-HP1-04	0.500	2.362	0.106	1.671	1.551	供試体浮き上がり スライス前供試体端面変色部あり 押えながらスライス
			No.9 KPDS-HP1-05	0.500	2.877	0.064	2.035	2.051	供試体浮き上がり 押えながらスライス
			No.9 KPDS-HP1-06	0.698	3.199	0.130	1.621	2.650	供試体浮き上がり 押えながらスライス
			No.9 KPDS-HP1-07	2.328	11.766	0.010	1.788	4.163	

表 3.3.3-4 モンモリロナイト溶解試験の解体結果



図 3.3.3-16 KPDS-HP1,KPDS-HP2の解体時の湿潤密度分布

(5) Na型ベントナイトのモンモリロナイトの溶解による力学挙動のまとめ

蒸留水による Na 型モンモリロナイトの飽和時の膨潤圧の計測結果と乾燥密度 1.4Mg/m³の Na 型モンモリロナイトの NaOH 水溶液通水時の膨潤圧の経時変化を比較すると、平衡膨潤圧 がほぼ同じ値であり、本試験期間程度の時間内であれば、高 pH がモンモリロナイトの膨潤圧 に及ぼす影響は小さいと言える。

乾燥密度 1.6Mg/m³で体積拘束した条件で NaOH 水溶液を通水した場合の膨潤圧の経時変化 から、NaOH 水溶液を通水するに従って膨潤圧が漸減していたが、漸減傾向は通水期間 800 日

程度でほぼ収束したように思われる。この膨潤圧の漸減には、リラクゼーション挙動やイオン 強度などの影響も考えられるため、実験によって定量的に評価を行った。

間隙水のイオン強度(pH13 の NaOH 水溶液、0.1mol/l)の影響が 1.0MPa 程度、間隙水の 陰イオンの違いによる影響が 0.5MPa 程度であることが分かった。さらに、イオン強度の違い により 1.5MPa 程度の差が生じることが分かった。イオン強度の影響は、イオン強度が 0 から 0.1 になった場合の影響は 0.5MPa 程度の影響であるのに対して、0.1~1.0 になった場合の影 響は 1.5MPa と急激に大きくなることが分かった。

KPDS-HP1 と KPDS-HP2 を比較することによって、陰イオンが Na 型モンモリロナイトの 圧密~クリープ挙動に及ぼす影響を調べた。その結果、KPDS-HP2 に比べ KPDS-HP1 の方が、 沈下量が有意に大きく、沈下曲線の勾配も KPDS-HP1 の方が大きいことが分かった。この勾 配の差がモンモリロナイトの溶解によるものである可能性があるため、解体を行った。解体時 の供試体の状況は、湿潤状態などの差異が観察された。供試体はスライスし、化学分析に供し た。

3.3.4 化学変質を伴う力学挙動試験試料の分析

HMC 連成解析による長期性能評価のための、ベントナイトの力学挙動のモデル化に反映、化 学解析手法への反映を目的とし、3.3.2 項及 3.3.3 項の Na 型モンモリロナイトの Ca 型化及び溶 解を伴う長期力学試験において解体した試料の分析を行い化学変質挙動を把握した。

力学試験後の試料

試験及び分析の対象とする試料を表 3.3.4-1に示す。また、表 3.3.4-2及び表 3.3.4-3に力学 試験のケースを示す。

試料	試料数
試験前試料	2 試料
高さ 20mm の供試体	1供試体6分割=6試料
高さ 5mm の供試体	5 供試体×3 分割=15 試料

表 3.3.4-1 変質固相分析試料

表 3.3.4-2 Na型ベントナイトの溶解に伴う力学挙動変化の取得試験ケース

	呼称	モンモリロナイト	間隙水	備考
No.2	KPCa	クニピア F 乾燥密度 1.4 Mg/m ³ 程度 ➡1.5 Mg/m ³ 程度	蒸留水 ⇒ CaCl₂水溶液 イオン強度 0.3mol/l 程度	 ※継続試験 乾燥密度 1.5Mg/m³で液種を CaCl₂水溶液に置換中 供試体高さ 20mm
No.3	KPCa-H	クニピア F 乾燥密度 1.4 Mg/m ³ 程度 ➡1.5 Mg/m ³ 程度	蒸留水	 ※継続試験 供試体高さ 5mm クリープ挙動の把握
No.4	CKPCa-H	Ca 型化クニピア F 乾燥密度 1.4 Mg/m ³ 程度 ➡1.5 Mg/m ³ 程度	蒸留水	 ※継続試験 供試体高さ 5mm クリープ挙動の把握
No.5	KPCa-N	クニピア F 乾燥密度 1.4 Mg/m ³ 程度 ➡1.5 Mg/m ³ 程度	蒸留水 ≕N aCl 水溶液 イオン強度 0.3mol/l 程度	 ※継続試験 供試体高さ 5mm イオン強度の影響把握

表 3.3.4-3 Na型ベントナイトの溶解に伴う力学挙動変化の取得試験ケース

	呼称	モンモリロナイト	間隙水	備考
No.9	KPDS-HP1	クニピア F 乾燥密度 1.6Mg/m ³ 程度	NaOH 水溶液 pH13 程度 超高圧、高通水圧	≫ 継続試験 供試体高さ 5mm
No.10	KPDS-HP2	クニピア F 乾燥密度 1.6Mg/m ³ 程度	NaCl 水溶液 0.1mol/l 程度 超高圧、高通水圧	※ 継続試験 供試体高さ 5mm

試料は、高さ 5mm の供試体は、通水側より高さ 1mm、2mm 及び 2mm の 3 分割、高さ 20mm の供試体は通水側より高さ 2mm、2mm 及び 2mm、残りは高さ方向 3 分割(高さ 20mm は合計 6 分割)を標準とする。

実際の試料分割は、高さ5mmの供試体は0.5mmの厚さに通水側より6枚スライスし、残り を7枚目とした。高さ20mmの供試体は通水側より、0.5mmの厚さに12枚、1.0mmの厚さ に12枚スライスし、残りの部分を加えて、25枚に分割した。試験の対象とする試料は、目的 に応じて標準として定められた厚さを基準として選択した。

- (2) 試験方法
 - 1) 液相分析

液相分析は、表 3.3.4-2及び表 3.3.4-3に示した、KPCa、KPCa-N、KPDS-HP1 及び KPDS-HP2 の排水について、排水として通水液が得られなかった KPCa-H 及び CKPCa-H の 2 ケースはメタルポーラスフィルターを洗浄することによって得られる間隙水について、 実施した。

メタルポーラスフィルターの洗浄はフィルターをテフロン容器中に入れ、蒸留水に浸し、 超音波を 30 分かけることによって洗い出し、その溶液を回収した。超音波洗浄は3回繰り返 し、得られた洗浄液は定溶にメスアップして分析に供した。

また、フィルターの間隙容積は、洗浄後のフィルターを蒸留水中に浸して超音波をあてる

ことによって、間隙を水で満たし、水中から引き揚げたフィルターを 105℃で乾燥させ、その前後の重量変化を容積とした。

液相分析の項目は、Na, K, Ca, Mg, Si, Al, Cl⁻, SO4²である。陽イオンは ICP-AES 分析に よって、陰イオンはイオンクロマトグラフィーによって測定した。Si、Al の分析の際は、ウ ルトラフィルター(USY-1:分画分子量 10,000)を用いて限外ろ過を施し、粘土成分を除去 した。

2) 乾燥密度

始めに、スライス後の各試料を恒量となるまで真空乾燥し、乾燥密度測定用に試料をカッ ターナイフなどで分割して、その分割率を測定した。その後メノウ乳鉢で粉砕し、粉砕した 試料を遠沈管に入れ、純水で3回、エタノールで2回洗浄及び洗浄後の遠心分離を繰り返し た。遠心分離後の固相は真空乾燥した。圧縮ベントナイト供試体の乾燥密度は洗浄及び真空 乾燥後の固相試料(以下、「前処理後の試料」という)の重量と 3.3.2 の(4)及び 3.3.3 の(4) スライス時の試料体積と質量(前処理後の質量を分割率を用いて、量り取り前の試料全体の質 量に換算)から乾燥密度を算出した

3) モンモリロナイト含有割合

各試料について、標準となる分割位置、及び全体を均等に見られる位置を考慮して 5mm の供試体は 3~4 箇所、20mmの供試体については、6 箇所を対象に分析した。(以下、各分 析に対して同様の試料を用いた。)熱分析(TG/DTA)を用いた手法[6]等により、試料中のモン モリロナイト含有割合を測定した。この方法は、モンモリロナイトの構造中の H₂O (H₂O-) が高温で脱離する際、その量がモンモリロナイト量に比例することを利用してモンモリロナ イトの含有量を測定するものである。

TG/DTA の測定にはリガク㈱の機器を用い、N₂ を 20ml/min の流量で流した雰囲気中で 10° C/min の速さで昇温して測定した。

まず、もっともモンモリロナイトの純度の高いクニピア-P とケイ砂を用いて、モンモリロ ナイトの定量のための検量線を作成した。図 3.3.4-1に検量線を示す。この検量線は、含水し ている水 (H2O+)の減量を示すピーク形状の違う Ca 型モンモリロナイト (図 3.3.4-2参照) に対しても基準となる Dry-Weight のピークの終点を考慮することにより、表 3.3.4-4に示す ように適用可能であった。

試料に含まれることが想定される二次鉱物についても同様に測定し(図 3.3.4-3)、モンモ リロナイト含有量の定量への影響を確認した。随伴鉱物のうち、カルサイト、ドロマイト、 パイライト等はモンモリロナイト定量のために使用する減量の温度範囲で減量することが認 められ、これらの鉱物が共存する場合はこの定量方法は適用できない。しかし、今回は随伴 鉱物をほとんど含まないクニピア・Fが対象となる試料であり、また二次鉱物として生成する ことが予想されるアナルサイム等のゼオライトのピークはモンモリロナイトの定量温度範囲 に減量ピークは認められないため、今回の分析にこの方法が適用できると判断した。実際に アナルサイムを既知量、クニピア・P と混合した試料による定量では、表 3.3.4-4に示すよう に、定量値は既知量と1%以内の精度で一致した。



図 3.3.4-1 TG によるモンモリロナイト含有率の検量線



図 3.3.4-2 クニピア·F、Na型と Ca型の比較(DTG 曲線)

	Sample	乾燥重量 (mg)	H ₂ O-(mg)	H₂O ⁻ (%)	Temp.range	モンモリロナイ ト含有率
1	Kunipia-P	7.653	0.354781	-4.64	530-830°C	99.00%
2	Kunipia-P	15.636	0.719094	-4.63	530-840°C	100.10%
3	Kunipia-P	23.086	1.07544	-4.66	530-840°C	100.30%
4	Kunipia-F	9.206	0.416188	-4.52	520-830°C	97.60%
5	Ca-Kunipia	16.807	0.76294	-4.54	500-745°℃	97.70%
6	Kunipia-P_79.8% +Analcime_20.2%	17.784	0.64534	-3.63	535-830°C	78.10%
7	Kunipia-P_93.8 % +Analcime_6.2%	14.483	0.55794	-4.32	535-830°C	93.20%

表 3.3.4-4 モンモリロナイトの定量法の検討



図 3.3.4-3 随伴鉱物の影響

(クニピア-PのDTG曲線は比較がしやすいよう、5倍の値を示している。)

4) AFM による溶解の測定

各試料について、モンモリロナイト粒子と力学試験前のモンモリロナイト粒子を、原子間 力顕微鏡(AFM: Atomic Force Microscopy)による直接観察によって、その形状の差を統計的 に比較して溶解量を算出した。

AFM の測定に供する試料は、ごく少量を純水に入れ、超音波で分散させた後、イオン交換 樹脂を共存させた純水中に入れて脱イオン処理し、白雲母基板上に滴下、35℃乾燥させたものを用いた。

5) XRD 分析

各試料について不定方位のX線回折データを得、その後、エチレングリコール処理後の定 方位分析を行い、Ca型化、二次鉱物の有無を検討した。 6) µ-XRD 分析

各試料について、µ-XRD を使用してデバイシェラーリングを測定し、解析して鉱物を同 定した。装置は Rigaku RINT Rapid (㈱リガク製)を用い、300 ミクロン径にコリメートさ れた X 線による分析を行った。

7) FESEM 観察及び EDS 分析

各試料について、純水中に分散し、ピペットを用いて、HOPG (highly oriented pyrolytic graphite: 高配向グラファイト) 基板上に滴下し、乾燥したものを Pt スパッタコートして、 FESEM(field emission scanning electron microscope)、JEOL JSM-6700F での観察に供した。加速電圧は 15 kV を用いて、観察と同時に EDS(energy dispersive X-ray spectrometer) による定量分析を行った。定量の際、補正法は、理論的に計算された内部標準データに基づく簡易 Oxide ZAF 法を用いた。微細部を観察(産状観察)も合わせて行い、二次鉱物の生成の 有無を確認した。二次鉱物の生成が認められた場合には、EDS により化学組成分析を行った。 また、モンモリロナイトの Ca 型化について、EDS により元素比を測定し、評価した。

- (3) 試験結果
 - 1) 液相分析結果

分析した試験液の組成を表 3.3.4-5に示す。

No.2の通水液のセルの入口側(IN)と出口側排液(OUT)の濃度の比較を図 3.3.4-4~図 3.3.4-6に示す。No.2 は Na 型クニピア・F に CaCl2 を通水している試験である。Na 型から Ca 型への変化による力学特性の変化をとらえるための試験である。Ca と Na の濃度変化は 図 3.3.4-4に示したように、OUT で Ca 濃度は低くなり、Na 濃度は高くなっていた。このこ とは Na 型のモンモリロナイトを Ca 型にする、という試験の目的に合致している。しかし、IN と OUT の濃度の差は mol 濃度に換算すると Ca が 108mmol/L に対し、Na が 775mmol/L であり、Ca と Na が 1 対 2 の交換としても Na 量が圧倒的に多く、交換を定量的に説明でき る濃度ではなかった。入口から出口に至る時間差等の影響があると考えられる。その他の元素は Al を除いてすべての元素が出口側で濃度が高くなっていた。中でも K, Mg, SO4²の増加が顕著であった。Si の濃度変化が大きくなく、またその成分を考えるとモンモリロナイト からの溶出よりもクニピア・F 中の随伴鉱物から溶出した可能性が高いと考えられる。

No.5 は Na 型クニピア・F に NaCl を通水している。イオン強度の影響をみるための試験で あり、モンモリロナイトの変質等は起こらないと予想された。図 3.3.4-7と図 3.3.4-8に IN と OUT の比較、試験中の排水の組成変化を示す。Na 濃度をはじめとするほとんどの元素は 濃度に変化がなく、モンモリロナイトの化学的変化が起きていないことが示された。唯一、 Ca 濃度だけが出口側で低くなっており、また、排水中の Ca 濃度は試験の開始時側の方が高 く、時間の経過とともに低くなっていた。通水している液中にはもともと Ca は含まれてお らず、IN の液中に Ca や、他のイオンが含まれていることは説明できる根拠がないが、通水 速度が非常に遅いことから、セルからの溶脱成分が拡散によって IN の溶液に存在している 可能性がある。 No.3 と No.4 は Na 型クニピア・F と Ca 型クニピア・F に蒸留水を通水した試験である(図 3.3.4・9、図 3.3.4・10)。両方とも、試験中に排水は得られなかったため、出口側の液相とし てフィルター中の液相を洗い出し、分析を行った。そのため、他の試験後の液相濃度データ に比べ、測定誤差は大きい。フィルター洗浄液中の Na, Cl, SO4²濃度は No.3 の方が高く、 Na 型モンモリロナイトから溶脱している可能性を示している。Si 濃度もフィルター洗浄液 の方が高いため、モンモリロナイトの溶解も考えられるが、SO4²は随伴鉱物(パイライト) の溶解によるもの、Cl・は Na 型モンモリロナイト調製時の NaCl の残存物の溶解等が考えら れる。Ca 型モンモリロナイトからは Na, Cl, SO4²濃度の溶脱は少なく、Na 型モンモリロ ナイトから Ca 型モンモリロナイトを調製する工程での洗浄効果があったことが予想される。 Si 濃度は同程度であったため、蒸留水によっても少量ながらモンモリロナイトあるいは石英 等が溶解していることが示唆される。また、フィルターを超音波で洗浄した際に、モンモリ ロナイトが液中にあることが確認されたので、セルからフィルター中に流出したモンモリロ ナイトの影響の可能性がある。

No.9 は、Na型クニピア・F に NaOH を通水した試験である(図 3.3.4・11、図 3.3.4・12)。 図 3.3.4・11に示すように、OUT の Na 濃度が高くなっており、アルカリによりモンモリロナ イト等が溶けていることが示唆されるが、Si は IN の方が高く、Si による溶解量の推定はで きない。また、SO4²・濃度が非常に高く、クニピア・F 中にパイライトが予想外に多く存在する ことが示された。Ca, Mg の濃度は上記の蒸留水の試験よりも少ないが、これは系内で二次 鉱物として沈殿している可能性もある。図 3.3.4・12に試験中の排水を時系列に並べたものの 液相濃度を示す。排液に溶存している各イオンが徐々に減少していることが読み取れる。Na 濃度は後半に再び上昇しているが、この原因は分からない。SO4²濃度は時間経過とともに低 くなっており、クニピア・F 中のパイライトが溶けて減少していることを反映していると思わ れる。同様に Ca 濃度も減少傾向を示している。Si は Na と同様に減少から増加に転じてい る。この挙動は、モンモリロナイト、石英等の溶解、二次鉱物の沈殿によるものと考えられ る。

No.10 はクニピア・F に 0.1mol/L の NaCl を通水した(図 3.3.4-13、図 3.3.4-14)。No.5 が 0.3 mol/L の NaCl であるのに加え、乾燥密度も No.10 の方が 0.1Mg/m³高い。IN と OUT の変化の傾向は No.5 とほぼ同じであるが、どのイオンも No.10 の方が低くなっていた。試験中の排水の液相濃度の変化の傾向は No.9 と似ていたが、濃度が高く、特に Ca, SO4²濃度 が高くなっていた。また、No.9 ではほとんど検出されなかった Mg も溶存していた。

表 3.3.4-5 試験液の組成

	ID	ベース成分	サンプル瓶	No.	液相重量	Na	К	Ca	Mg	Si	Al	CI	SO4
	K5-I	NaCl 0.3M	ガラス瓶20ml	1	-	5638.8	60.7	142	22.4	21.2	0.27	10780	3520
	K5-0	NaCl 0.3M	ガラス瓶20ml	2	-	5651	61.2	65.0	24.0	25.6	0.16	9610	4000
	K5-F	NaCl 0.3M	フィルター		-	5602	78.6	36.5	2.58	51.5	ND	11188	2422
	K10-I	NaCl 0.1M	ガラス瓶20ml	3	2.504	4105.2	32.4	64.2	8.9	14.6	0.10	5455	1955
	K10-0	NaCl 0.1M	ガラス瓶20ml	4	2.709	3520	23.0	35.7	6.4	19.4	0.02	4747	1286
	K9-I	NaOH pH13	ガラス瓶20ml	5	3.673	431.5	8.9	0.6	ND	66.5	0.02	6.15	36.3
解体時試験容器内	K9-0	NaOH pH13	ガラス瓶20ml	6	2.593	1101	12.0	0.6	ND	12.3	0.04	201	1658
	K3—I	H2O	ガラス瓶20ml	7	0.578	171.8	29.4	68.65	ND	25.9	0.67	345	734
	K3-F	H2O	フィルター			1200	267	12.2	22.2	83.0	ND	87.9	1397
	K4-I	H2O	ガラス瓶20ml	9	0.618	146.6	129.2	44.4	ND	19.7	ND	92.8	88.3
	K4-F	H2O	フィルター	-		475.8	377	3.2	113.8	79.7	ND	14.3	129.8
	K2-I	CaCl2	ガラス瓶2ml	70	1.492	6021	71.4	4946	23.5	39.5	8.02	22210	1800
	K2-0	CaCl2	ガラス瓶2ml	71	0.918	23849	234	600	92.1	51.8	0.36	28900	24320
	K5-1	NaCl 0.3M	ガラス瓶2ml	60	1.59	7607	83.7	137	31.1	32.3	ND	11570	6870
	K5-2	NaCl 0.3M	ガラス瓶20ml	欠番	_	7465	91.4	83.03	28.8	30.8	ND	12550	5950
	K10-1	NaCl 0.1M	ガラス瓶2ml	2	1.84	7796	44.1	143	28.7	31.8	ND	8388	11096
	K10-2	NaCl 0.1M	ガラス瓶2ml	9	1.58	4914	61.5	41.4	14.4	28.9	ND	6563	5635
	K10-3	NaCl 0.1M	ガラス瓶2ml	4	1.22	4532	39.8	37.0	13.0	31.0	ND	6745	4904
	K10-4	NaCl 0.1M	ガラス瓶2ml	5	1.77	3983	52.4	33.9	10.1	28.3	ND	6518	3248
試驗山排水	K10-5	NaCl 0.1M	ガラス瓶2ml	6	1.5	3738	14.8	41.2	8.6	27.9	ND	7037	2487
ロベッズ「丁ゴクトノハ	K10-6	NaCl 0.1M	ガラス瓶20ml	101	4.102	4325	34.2	21.1	6.7	28.5	ND	6266	1888
	K9-1	NaOH pH13	ガラス瓶2ml	8	0.98	3316	41.4	13.0	0.3	47.0	ND	392	4797
	K9-2	NaOH pH13	ガラス瓶2ml	7	1.58	2757	27.1	9.7	ND	39.4	ND	357	3901
	K9-3	NaOH pH13	ガラス瓶2ml	3	1.72	2130	30.1	6.9	ND	37.8	ND	297	2979
	K9-4	NaOH pH13	ガラス瓶2ml	11	1.56	1799	41.2	4.5	ND	44.1	ND	294	2510
	K9-5	NaOH pH13	ガラス瓶2ml	12	1.54	1663	67.2	2.7	ND	52.4	ND	281	2234
	K9-6	NaOH pH13	ガラス瓶20ml	102	3.222	1876	13.3	1.2	ND	75.5	ND	231	2089



図 3.3.4-4 No.2 IN と OUT の Ca, Na 濃度



図 3.3.4-5 No.2 IN と OUT の液相濃度 (K,Mg,Si,Al)



図 3.3.4-6 No.2 IN と OUT の液相濃度 (Cl,SO₄)



図 3.3.4-7 No.5 IN と OUT の液相濃度



図 3.3.4-8 No.5 試験中排水の液相濃度



図 3.3.4-9 No.3 IN とフィルター洗浄水の液相濃度



図 3.3.4-10 No.4 IN とフィルター洗浄水の液相濃度



図 3.3.4-11 No.9 IN と OUT の液相濃度



図 3.3.4-12 No.9 試験中排水の液相濃度



図 3.3.4-13 No.10 IN と OUT の液相濃度



図 3.3.4-14 No.10 試験中排水の液相濃度

2) 乾燥密度

表 3.3.4-6及び図 3.3.4-15~図 3.3.4-16に結果を示す。通水液の塩濃度が高い系の供試体 は通水入口側の密度が低くなっている傾向が見られた(図 3.3.4-17参照)。通水側で溶解、 二次鉱物の生成が起こっている可能性がある。通水液が H₂O の試験(No.3 と No.4)では、 場所によるバラつきはなく、通水による影響が少ないことがわかる(図 3.3.4-18参照)。ま た、一方で化学的な影響以外にも、荷重を解放した時の膨潤の影響による密度の変化も考え られる。

No.9 は最も密度のバラつきが大きいが、この要因として、スライスの際のコンディション によるものと、通水液が NaOH であったために、モンモリロナイトが溶解あるいは変質して いたためとの2つが考えられる。また、表中に赤でハッチングした試料については、スライ ス時に異常があったことが記録されており、密度がスライス時に変化している可能性が高い。

No.2の長期の試験についても、乾燥密度は大きく変化していないことが読みとれる。入口 側の乾燥密度が低くなっていると共に、出口側の層の乾燥密度も下がっている。出口側の密 度減少は試験中に密度分布に変化があった可能性と、解体時に荷重が解放されたことが影響 した可能性が考えられるが、原因についてはこの分析では判断できない。

表 3.3.4-6 密度の測定結果

10.3	KPGa-H	HZU		-			-								
			乾燥前		乾燥後		分割				乾燥	密度			
	厚み(mm)	体積(cm ³)	切断直後の	乾燥後の重			分割後の重量	() that the	天日八〇		全重量	乾燥密度	位置	メモ	特記事項
			重量(g)	量(g)	减重率	洗净酊密度	(g)	分割率	重重(g)	减量率	(g)	(g/cm^3)			
1	0.950	2.685	4.610	4.2011	8.9%	1.565	1.9313	46.0%	1.8779	2.8%	4.085	1.522	0.475	スライス片実測	
2	0. 501	1.416	2.675	2.3315	12.8%	1.647	1.167	50.1%	1.1167	4.3%	2.231	1.576	1. 201		
3	0. 501	1.416	2.649	2.3071	12.9%	1.630	1.1402	49.4%	1.0892	4.5%	2.204	1.557	1.702		
4	0. 501	1.416	2.706	2.3036	14.9%	1.627	1.0417	45.2%	0.9889	5.1%	2.187	1.545	2.203	試料面乾燥	
5	0.500	1.413	2.665	2.2805	14.4%	1.614	1.02	44.7%	0.9808	3.8%	2.193	1.552	2.703		
6	0. 501	1.416	2. 628	2.2369	14.9%	1.580	1.1392	50.9%	1.0889	4.4%	2.138	1.510	3. 204		
7	1. 338	3.780	6.977	5.9111	15.3%	1.564	0.9328	15.8%	0.9025	3.2%	5.719	1.513	4. 123		
No.4	CKPCa-H	Ca型 H2O													
			乾燥前	乾燥後			分割				乾燥密度				
	厚み(mm)	体積(cm ³)	切断直後の	乾燥後の重			分割後の重量				全重量	乾燥密度	位置	メモ	特記事項
			重量(g)	〒(g)	減量率	洗浄前密度	(g)	分割率	重量(g)	減量率	(g)	(α/cm^3)			
1	0 740	2.091	3 554	3,1735	10.7%	1.518	1.5491	48.8%	1.5429	0.4%	3.161	1.511	0 370	スライス片実測	
2	0, 500	1.413	2, 593	2.2476	13.3%	1.591	1.1637	51.8%	1.1624	0.1%	2.245	1.589	0.990		
3	0.504	1.424	2,606	2.3202	11.0%	1.629	1,1477	49.5%	1,1474	0.0%	2.320	1.629	1, 492		
4	0, 500	1.413	2, 594	2.2464	13.4%	1.590	1.1701	52.1%	1.1590	0.9%	2.225	1.575	1, 994		
5	0. 501	1.416	2.631	2.3261	11.6%	1.643	0.9325	40.1%	0.9314	0.1%	2.323	1.641	2.495		
6	0.500	1.413	2. 585	2.2551	12.8%	1.596	0.9313	41.3%	0.9290	0.2%	2.250	1.592	2.995		
7	1.605	4.536	8.866	7.5536	14.8%	1.665	1.2301	16.3%	1.2253	0.4%	7.524	1.659	4.048		
No.5	KPCa-N	NaCl 0.3mo	1/1												
			訪慢前	乾燥後		分割				訪嬠密度					
	厚み(mm)	休穑(cm ³)		+=			八向火の手目		-			北极中央	位置	メモ	特記事項
		Projection /	切断 直 俊 の 重 号 (…)	乾燥後の里 号()	減量率	洗浄前密度	分割後の里重	分割率	里重	減量率	至里重	乳深省度 ((3)		, -	10107-14
1	0 502	1.410	里里(g)	里(g) 1 E 1 0	17.0%	1.070	(g)	E2.0%	(g)	10.5%	(g)	(g/cm ⁻)	0.051		
2	0.502	1.419	2.456	2.062	16.0%	1.070	1.0443	50.6%	0.0204	10.3% 5.3%	1.358	1 3 7 9	0.201		
2	0.500	1,410	2.450	2.002	15.7%	1.430	1.0443	47.0%	0.9636	1.6%	2 0 5 2	1.379	1 253		
4	0.500	1 413	2.664	2.152	16.8%	1.568	1 1298	51.0%	1 0842	4.0%	2.032	1.504	1 753		
5	0,500	1.413	2.665	2.282	14.4%	1.615	1.0929	47.9%	1.0478	4.1%	2,188	1.548	2. 253		
6	0.500	1.413	2.657	2.234	15.9%	1.581	1.0959	49.1%	1.0584	3.4%	2.158	1.527	2.753		
7	2. 253	6.366	10.596	8.415	20.6%	1.322	2.1171	25.2%	2.0934	1.1%	8.321	1.307	4.129		
No.9	KPDS-HP1	NaOH pH13	3												
			46.10.46	乾燥後		分割		洗浄後		乾燥密度					
			乾燥前		乾燥後		(分割) (分割) (分割) (分割) (分割) (分割) (分割) (分割)		洗浄	後	乾燥	習度			
	厚み(mm)	体積(cm ³)	乾燥前 切断直後の	乾燥後の重	乾燥後		分割 谷割後の香景	l	洗浄	後	乾燥部	了度	位置	メモ	特記事項
	厚み(mm)	体積(cm ³)	乾燥前 切断直後の ⁽)	乾燥後の重 量(g)	乾燥後 減量率	洗浄前密度	分割 分割後の重量 (g)	分割率	洗洕 <u>重量(g)</u>	後減量率	乾燥8 全重量 (g)	否度 乾燥密度 (((位置	メモ	特記事項
1	厚み(mm) 0.500	体積(cm ³)	乾燥前 切断直後の 重量(g) 1.693	乾燥後の重 量(g) 1.3045	乾燥後 減量率 22.9%	洗浄前密度 0.923	分割 分割後の重量 (g) 0.7606	 分割率 58.3%	洗浄 重量(g) 0.7178	·後 減量率 5.6%	乾燥器 全重量 (g) 1.231	密度 乾燥密度 (g/cm ³) 0.871	位置 0.250	メモ	特記事項
1	厚み(mm) <u>0.500</u> 0.500	体積(cm ³) <u>1.413</u> 1.413	乾燥前 切断直後の 重量(g) <u>1.693</u> 2.671	乾燥後の重 量(g) 1.3045 2.2357	乾燥後 減量率 <u>22.9%</u> 16.3%	洗浄前密度 0.923 1.582	分割後の重量 (g) 0.7606 1.0428) 分割率 58.3% 46.6%	洗洕 重量(g) <u>0.7178</u> 1.0077	·後 減量率 <u>5.6%</u> 3.4%	乾燥器 全重量 (g) <u>1.231</u> 2.160	资度 乾燥密度 (g/cm ³) 0.871 1.529	位置 0.250 0.750	メモ	特記事項
1	厚み(mm) 0.500 0.500	体積(cm ³) <u>1.413</u> <u>1.413</u> 0.851	乾燥前 切断直後の 重量(g) <u>1.693</u> <u>2.671</u> 1.218	乾燥後の重 量(g) 1.3045 2.2357	乾燥後 減量率 22.9% 16.3%	洗浄前密度 0.923 1.582	分割後の重量 (g) 0.7606 1.0428 0.3606) 分割率 58.3% 46.6% 33.2%	洗済 重量(g) 0.7178 1.0077 0.2872	後 減量率 5.6% 3.4%	乾燥器 全重量 (g) 1.231 2.160 0.865	密度 乾燥密度 (g/cm ³) 0.871 1.529 1.017	位置 0.250 0.750	メモ	特記事項 ブレード加熱変色 水
1 2 3	厚み(mm) 0.500 0.500 0.301	体積(cm ³) 1.413 1.413 0.851	乾燥前 切断直後の 重量(g) <u>1.693</u> <u>2.671</u> 1.218	乾燥後の重 量(g) 1.3045 2.2357 1.0865	乾燥後 減量率 <u>22.9%</u> <u>16.3%</u> 10.8%	洗浄前密度 0.923 1.582 1.277	分割後の重量 (g) 0.7606 1.0428 0.3606	 分割率 58.3% 46.6% 33.2%	洗浄 重量(g) 0.7178 1.0077 0.2872	後 減量率 <u>5.6%</u> 3.4% 20.4%	乾燥者 全重量 (g) <u>1.231</u> <u>2.160</u> 0.865	習度 乾燥密度 (g/cm ³) 0.871 1.529 1.017	位置 0.250 0.750 1.151	メモ リング滑り	特記事項 ブレード加熱変色 水 分蒸散多いと考えられ
1 2 3 4	厚み(mm) 0.500 0.500 0.301 0.500	体積(cm ³) <u>1.413</u> <u>1.413</u> 0.851 1.413	乾燥前 切断直後の 重量(g) <u>1.693</u> <u>2.671</u> 1.218 2.362	乾燥後の重 量(g) 1.3045 2.2357 1.0865 2.1081	乾燥後 減量率 22.9% 16.3% 10.8% 10.7%	洗浄前密度 0.923 1.582 1.277 1.492	分割後の重量 (g) 0.7606 1.0428 0.3606 0.8332	J 分割率 58.3% 46.6% 33.2% 39.5%	洗済 重量(g) 0.7178 1.0077 0.2872 0.7848	後 減量率 5.6% 3.4% 20.4% 5.8%	乾燥者 全重量 (g) 1.231 2.160 0.865 1.986	登度 乾燥密度 (g/cm ³) 0.871 1.529 1.017 1.405	位置 0.250 0.750 1.151 1.551	メモ リング滑り 供試体浮き上がり	特記事項 ブレード加熱変色 水 <u>分蒸散多いと考えられ</u> スライス前供試体 端面変色のあり
1 2 3 4 5	厚み(mm) 0.500 0.500 0.301 0.500 0.500	体積(cm ³) <u>1.413</u> <u>1.413</u> 0.851 <u>1.413</u> <u>1.413</u>	乾燥前 切断直後の 重量(g) 1.693 2.671 1.218 2.362 2.877	乾燥後の重 量(g) 1.3045 2.2357 1.0865 2.1081 2.5197	乾燥後 減量率 22.9% 16.3% 10.8% 10.7% 12.4%	洗浄前密度 0.923 1.582 1.277 1.492 1.783	分害 分割後の重量 (g) 0.7606 1.0428 0.3606 0.8332 1.1686	J 分割率 58.3% 46.6% 33.2% 39.5% 46.4%	洗済 重量(g) 0.7178 1.0077 0.2872 0.7848 1.1234	後 減量率 5.6% 3.4% 20.4% 5.8% 3.9%	乾燥器 全重量 (g) 1.231 2.160 0.865 1.986 2.422	密度 乾燥密度 (g/cm ³) 0.871 1.529 1.017 1.405 1.714	位置 0.250 0.750 1.151 1.551 2.051	メモ リング滑り 供試体浮き上がり 供試体浮き上がり	特記事項 ブレード加熱変色 水 <u>7歳散多いと考えられ</u> スライス前供試体 端面変色部あり
1 2 3 4 5 6	厚み(mm) 0.500 0.500 0.301 0.500 0.500 0.698	体積(cm ³) 1.413 1.413 0.851 1.413 1.413 1.413 1.973	乾燥前 切断直後の 重量(g) 1.693 2.671 1.218 2.362 2.362 2.877 3.199	乾燥後の重 量(g) 1.3045 2.2357 1.0865 2.1081 2.5197 2.8409	乾燥後 減量率 22.9% 16.3% 10.8% 10.7% 12.4% 11.2%	洗浄前密度 0.923 1.582 1.277 1.492 1.783 1.440	分害 分割後の重量 (g) 0.7606 1.0428 0.3606 0.8332 1.1686 1.3363	分割率 58.3% 46.6% 33.2% 39.5% 46.4% 47.0%	洗済 重量(g) 0.7178 1.0077 0.2872 0.7848 1.1234 1.2878	後 減量率 5.6% 3.4% 20.4% 5.8% 3.9% 3.6%	乾燥器 全重量 (g) 1.231 2.160 0.865 1.986 2.422 2.738	登度 乾燥密度 (g/cm ³) 0.871 1.529 1.017 1.405 1.714 1.388	位置 0.250 0.750 1.151 1.551 2.051 2.650	メモ リング滑り 供試体浮き上がり 供試体浮き上がり	特記事項 ブレード加熱変色 水 分蒸散多いと考えられ スライス前供試体 端面変色部あり
1 2 3 4 5 6 7	厚み(mm) 0.500 0.500 0.301 0.500 0.500 0.698 2.328	体積(cm ³) 1.413 1.413 0.851 1.413 1.413 1.973 6.578	乾燥町 切断直後の 重量(g) 1.693 2.671 1.218 2.362 2.877 3.199 11.766	乾燥後の重 量(g) 1.3045 2.2357 1.0865 2.1081 2.5197 2.8409 9.9245	乾燥後 減量率 22.9% 16.3% 10.8% 10.7% 12.4% 11.2%	洗浄前密度 0.923 1.582 1.277 1.492 1.783 1.440 1.509	分割後の重量 (g) 0.7606 1.0428 0.3606 0.8332 1.1686 1.3363 1.601	分割率 58.3% 46.6% 33.2% 39.5% 46.4% 47.0% 16.1%	洗済 重量(g) 0.7178 1.0077 0.2872 0.7848 1.1234 1.2878 1.5852	後 減量率 5.6% 3.4% 20.4% 5.8% 5.8% 3.9% 3.6% 1.0%	乾燥器 全重量 (g) 1.231 2.160 0.865 1.986 2.422 2.738 9.827	登度 乾燥密度 (g/cm ³) 0.871 1.529 1.017 1.405 1.714 1.388 1.494	位置 0.250 0.750 1.151 1.551 2.051 2.650 4.163	メモ リング湯り 供試体浮き上がり 供試体浮き上がり	特記事項 ブレード加熱変色 水 分高数多いと考えられ 端面変色部あり
1 2 3 4 5 6 7 No.10	厚み(mm) 0.500 0.301 0.500 0.500 0.500 0.698 2.328 KPDS-HP2	体積(cm ³) 1.413 1.413 0.851 1.413 1.413 1.413 1.973 6.578 NaCl 0.1mo	乾燥町 切断直後の 重量(g) 1.693 2.671 1.218 2.362 2.877 3.199 11.766	乾燥後の重 量(g) 1.3045 2.2357 1.0865 2.1081 2.5197 2.8409 9.9245	乾燥後 減量率 22.9% 16.3% 10.8% 10.7% 12.4% 11.2% 15.7%	洗浄前密度 0.923 1.582 1.277 1.492 1.783 1.440 1.509	分割後の重量 (g) 0.7606 1.0428 0.3606 0.8332 1.1686 1.3363 1.601		洗済 重量(g) 0.7178 1.0077 0.2872 0.7848 1.1234 1.2878 1.5852	後 減量率 5.6% 3.4% 20.4% 5.8% 5.8% 3.9% 1.0%	乾燥器 全重量 (g) 1.231 2.160 0.865 1.986 2.422 2.738 9.827	资度 乾燥密度 (g/cm ³) 0.871 1.529 1.017 1.405 1.714 1.388 1.494	位置 0.250 0.750 1.151 1.551 2.051 2.650 4.163	メモ リング滑り 供試体浮き上がり 供試体浮き上がり	特記事項 ブレード加熱変色 水 <u>分素数多いと考えられ</u> スライス前供試体 端面変色部あり
1 2 3 4 5 6 7 No.10	厚み(mm) 0.500 0.301 0.500 0.500 0.698 2.328 KPDS-HP2	体積(cm ³) 1.413 1.413 0.851 1.413 1.413 1.973 6.578 NaCl 0.1mo	乾燥前 切断直後の 重量(g) 1.693 2.671 1.218 2.362 2.877 3.199 11.766 1/1	乾燥後の重 量(g) 1.3045 2.2357 1.0865 2.1081 2.5197 2.8409 9.9245	乾燥後 減量率 22.9% 16.3% 10.8% 10.7% 12.4% 11.2% 15.7% 乾燥後	洗浄前密度 0.923 1.582 1.277 1.492 1.783 1.440 1.509	分割 分割後の重量 (g) 0.7606 1.0428 0.3606 0.8332 1.1686 1.3363 1.601 、のののである。 1.686 1.3363 1.601 、のののののののののののののののののののののののののののののののののののの	分割率 58.3% 46.6% 33.2% 39.5% 46.4% 47.0% 16.1%	洗済 重量(g) 0.7178 1.0077 0.2872 0.7848 1.1234 1.2878 1.5852	後 減量率 5.6% 3.4% 20.4% 5.8% 5.8% 3.9% 1.0%	較操留 全重量 (g) 1.231 2.160 0.865 1.986 2.422 2.738 9.827 乾燥習	资度 乾燥密度 (g/cm ³) 0.871 1.529 1.017 1.405 1.714 1.388 1.494	位置 0.250 0.750 1.151 1.551 2.051 2.650 4.163	メモ リング滑り 供試体浮き上がり 供試体浮き上がり	特記事項 ブレード加熱変色 水 <u>ク温数多いと考えられ</u> スライス前代試体 端面変色部あり
1 2 3 4 5 6 7 No.10	厚み(mm) 0.500 0.500 0.301 0.500 0.698 2.328 KPDS-HP2 厚み(mm)	体積(cm ³) 1.413 1.413 0.851 1.413 1.413 1.413 1.973 6.578 NaCl 0.1mo 体積(cm ³)	較 原 前 切 断 値 後 の 1.693 2.671 1.218 2.362 2.877 3.199 11.766 バI 乾燥前	乾燥後の重 量(g) 1.3045 2.2357 1.0865 2.1081 2.5197 2.8409 9.9245	乾燥後 減量率 22.9% 16.3% 10.8% 10.7% 12.4% 11.2% 15.7% 乾燥後	洗浄前密度 0.923 1.582 1.277 1.492 1.783 1.440 1.509	分割後の重量 (g) 0.7606 1.0428 0.3606 0.8332 1.1686 1.3363 1.601 分割後の更量		洗済 重量(g) 0.7178 1.0077 0.2872 0.7848 <u>1.1234</u> 1.2878 1.5852	後 減量率 5.6% 3.4% 20.4% 5.8% 3.9% 3.6% 1.0%	較操留 全重量 (g) 1.231 2.160 0.865 1.986 2.422 2.738 9.827 乾燥習 全重量	资度 乾燥密度 (g/cm ³) 0.871 1.529 1.017 1.405 1.714 1.388 1.494 3 了度 数機密度 数機密度 数機密度 数機密度	位置 0.250 0.750 1.151 1.551 2.051 2.650 4.163	メモ リング滑り 供試体浮き上がり 供試体浮き上がり メモ	特記事項 ブレード加熱変色 水 <u>分置数多いと考えられ</u> スライス前供試体 端面変色部あり 特記事項
1 2 3 4 5 6 6 7 7 No.10	厚み(mm) 0.500 0.500 0.301 0.500 0.698 2.328 KPDS-HP2 厚み(mm)	体積(cm ³) 1.413 1.413 0.851 1.413 1.413 1.973 6.578 NaCl 0.1mo 体積(cm ³)	乾燥前 切断直後の 重量(g) 1.693 2.671 1.218 2.362 2.877 3.199 11.766 //I 乾燥前 切断直後の 重量(g)	乾燥後の重 量(g) 1.3045 2.2357 1.0865 2.1081 2.5197 2.8409 9.9245 乾燥後の重 量(g)	乾燥後 減量率 22.9% 16.3% 10.8% 10.7% 12.4% 11.2% 15.7% 乾燥後 減量率	洗浄前密度 0.923 1.582 1.277 1.492 1.783 1.440 1.509 洗浄前密度	分割 分割後の重量 (g) 0.7606 1.0428 0.3606 0.8332 1.1686 1.3363 1.601 分割後の重量 (p)	分割率 58.3% 46.6% 33.2% 39.5% 46.4% 47.0% 16.1%	洗済 重量(g) 0.7178 1.0077 0.2872 0.7848 1.1234 1.2878 1.5852 重量(g)	後 減量率 5.6% 3.4% 20.4% 5.8% 3.9% 3.6% 1.0%	較燥器 全重量 (g) 1.231 2.160 0.865 1.986 2.422 2.738 9.827 乾燥器 全重量 (g)	3度 乾燥密度 (g/cm ³) 0.871 1.529 1.017 1.405 1.714 1.388 1.494 3度 変集 変集 な機密度 (g/cm ³)	位置 0.250 0.750 1.151 1.551 2.051 2.650 4.163 位置	メモ リング滑り 供試体浮き上がり 供試体浮き上がり 供試体浮き上がり メモ	特記事項 <u>ブレード加熱変色 水 ク点散多いと考えられ</u> スライス前供試体 端面変色部あり 特記事項
1 2 3 4 5 6 7 No.10	厚み(mm) 0.500 0.500 0.301 0.500 0.698 2.328 KPDS-HP2 厚み(mm) 0.501	体積(cm ³) 1.413 1.413 0.851 1.413 1.413 1.413 6.578 NaCl 0.1mo 体積(cm ³) 1.415	 乾燥前 切断直後の 重量(g) 1.693 2.671 1.218 2.362 2.877 3.199 11.766 レ1 乾燥前 切断直後の 重量(g) 1.985 	乾燥後の重 <u>量(g)</u> 1.3045 2.2357 1.0865 2.1081 2.5197 2.8409 9.9245 乾燥後の重 <u>量(g)</u> 1.6674	乾燥後 減量率 22.9% 16.3% 10.8% 10.7% 12.4% 11.2% 15.7% 乾燥後 減量率 16.0%	洗浄前密度 0.923 1.582 1.277 1.492 1.783 1.440 1.509 洗浄前密度 1.178	分割 分割後の重量 (g) 0.7606 1.0428 0.3606 0.8332 1.1886 1.3363 1.601 分割後の重量 (g) 0.7286	分割率 58.3% 46.6% 33.2% 39.5% 46.4% 47.0% 16.1% ○日本ののでは、「「「」」」 ○日本ののでは、「」」 ○日本のののでは	洗済 重量(g) 0.7178 1.0077 0.2872 0.7848 1.1234 1.2878 1.5852 重量(g) 0.6726	後 減量率 5.6% 3.4% 20.4% 5.8% 3.9% 3.3.6% 1.0%	乾燥器 全重量 (g) 1.231 2.160 0.865 1.986 2.422 2.738 9.827 乾燥器 9.827 乾燥器 全重量 (g) 1.539	3度 乾燥密度 (g/cm ³) 0.871 1.529 1.017 1.405 1.714 1.388 1.494 33度 乾燥密度 (g/cm ³) 1.087	位置 0.250 0.750 1.151 1.551 2.051 2.650 4.163 位置 0.251	メモ リング滑り 供試体浮き上がり 供試体浮き上がり 供試体浮き上がり	特記事項 <u>ブレード加熱変色 れ 分素数多いと考えられ</u> 端面変色部あり 特記事項
1 2 3 4 5 6 6 7 No.10	厚み(mm) 0.500 0.500 0.500 0.500 0.698 2.328 KPDS-HP2 厚み(mm) 0.501 0.501	体積(cm [°]) 1.413 1.413 0.851 1.413 1.413 1.413 1.413 0.578 NaCl 0.1mo 体積(cm [°]) 1.416 1.416	乾燥前 切断直後の 重量(g) 1.693 2.671 1.218 2.362 2.877 3.199 11.766 //I 乾燥前 切断直後の 重量(g) <u>1.985</u> 2.554	乾燥後の重 量(g) 1.3045 2.2357 1.0865 2.1081 2.5197 2.5409 9.9245 乾燥後の重 量(g) 1.6674 2.19	乾燥後 減量率 22.9% 16.3% 10.8% 10.7% 12.4% 11.2% 15.7% 乾燥後 減量率 16.0% 14.4%	洗浄前密度 0.923 1.582 1.277 1.492 1.783 1.440 1.509 洗浄前密度 1.544	分割 分割後の重量 (g) 0.7606 1.0428 0.3606 0.8332 1.1686 1.3363 1.601 分割後の重量 (g) 0.7286 1.0781	→ 分割率 58.3% 46.6% 33.2% 39.5% 46.4% 47.0% 16.1% ○ 分割率 43.7% 49.2%	洗済 重量(g) 0.7178 1.0077 0.2872 0.7848 1.2234 1.2234 1.2878 1.5852 重量(g) 0.6726 1.0339	後 減量率 5.6% 3.4% 20.4% 5.8% 3.9% 3.9% 1.0% 減量率 7.7% 4.1%	乾燥8 全重量 (g) 1.231 2.160 0.865 1.986 2.422 2.738 9.827 乾燥8 全重量 (g) 1.539 2.100	3度 乾燥密度 (g/cm ³) 0.871 1.529 1.017 1.405 1.714 1.388 1.714 1.388 1.714 1.388 1.494 乾燥密度 (g/cm ³) 1.087 1.487	位置 0.250 0.750 1.151 1.551 2.650 4.163 位置 0.251 0.752	メモ リング滑り 供試体浮き上がり 供試体浮き上がり メモ	特記事項 <u> フレード加熱変色 水 分素数多いと考えられ</u> スライス前候試体 第面変色部あり 特記事項
1 2 3 4 5 6 6 7 7 No.10	厚み(mm) 0.500 0.500 0.500 0.500 0.500 0.698 2.328 KPDS-HP2 厚み(mm) 0.501 0.502 0.502	体積(cm ²) 1.413 1.413 0.851 1.413 1.413 1.973 6.578 NaCl 0.1mo 体積(cm ²) 1.416 1.419 1.419 1.419 1.419	乾廃町 切斯直後の <u>事量(g)</u> 1.693 2.671 1.218 2.362 2.877 3.199 11.766 (/) 乾燥前 切斯直後の <u>事量(g)</u> 1.985 2.554 2.654	乾燥後の重 量(g) 1.3045 2.2357 1.0865 2.1081 2.5197 2.8409 9.9245 乾燥後の重 量(g) 1.6674 2.2690	乾燥後 減量率 22.9% 16.3% 10.7% 10.7% 10.7% 11.25% 15.7% 乾燥後 減量率 16.0% 14.3% 13.4%	洗浄前密度 0.923 1.582 1.277 1.492 1.783 1.440 1.509 洗浄前密度 1.178 1.544 1.504	分割 分割後の重量 (g) 0.7606 1.0428 0.3606 0.8332 1.1686 1.3363 1.3631 1.601 分割後の重量 (g) 0.7286 1.0781 1.0257	分割率 58.3% 46.6% 33.2% 39.5% 46.4% 47.0% 16.1% う割率 43.7% 49.2% 45.2%	洗済 重量(g) 0.7178 1.0077 0.2872 0.7848 1.1234 1.2878 1.5852 重量(g) 0.6726 1.0339 0.9750	後 減量率 5.6% 3.4% 20.4% 5.8% 3.9% 3.6% 1.0% 減量率 7.7% 4.1%	乾燥8 全重量 (g) 1.231 2.160 0.865 1.986 2.422 2.738 9.827 乾燥8 (g) 1.539 2.100 2.157	3度 乾燥密度 (g/cm ³) 0.871 1.529 1.017 1.405 1.714 1.388 1.494 3度 乾燥密度 (g/cm ³) 1.087 1.480 1.526	位置 0.250 0.750 1.151 1.551 2.051 2.650 4.163 位置 0.251 0.752 1.253	メモ リング滑り 供試体浮き上がり 供試体浮き上がり 供試体浮き上がり メモ	特記事項 <u> ブレード加熱変色 * 分蒸散多いと考えられ</u> スライス前供試体 端面変色部あり 特記事項
1 2 3 4 5 6 7 7 No.10	厚み(mm) 0.500 0.500 0.301 0.500 0.698 2.328 KPDS-HP2 厚み(mm) 0.501 0.502 0.500 0.500	体積(cm ³) 1.413 1.413 0.851 1.413 1.413 1.973 6.578 NaCl 0.1mo 体積(cm ³) 1.416 1.419 1.413 1.413	究策判 究策判 切斯直後の 重量(g) 1.693 2.671 1.218 2.877 3.199 1.17.76 //1 乾燥前 切斯直後の 重量(g) 1.985 2.554 2.620 2.680	乾燥後の重 量(g) 1.3045 2.2357 1.0865 2.1081 2.5197 2.8409 9.9245 乾燥後の重 量(g) 1.6674 2.19 2.2690 2.3747	乾燥後 減量率 22.9% 16.3% 10.8% 10.8% 10.8% 10.8% 10.8% 11.2% 11.5.% 就量率 16.0% 14.3% 11.6%	洗净前密度 0.923 1.582 1.277 1.492 1.773 1.440 1.509 洗净前密度 1.178 1.544 1.544 1.606	分割 分割後の重量 (g) 0.7606 1.0428 0.3606 0.8332 1.1886 1.3363 1.601 分割後の重量 (g) 0.7286 1.0781 1.0257 1.0832		洗済 重量(g) 0.7178 1.0077 0.2872 0.7848 1.1234 1.2878 1.5852	後 減量率 5.6% 3.4% 5.8% 3.9% 3.6% 1.0% 減量率 7.7% 4.1% 4.9% 4.0%	乾燥6 全重量 (g) 1.231 2.160 0.865 2.422 2.738 9.827 乾燥8 全重量 (g) 2.100 2.157 2.279	3度 乾燥密度 (g/cm ³) 0.8711 1.529 1.017 1.405 1.714 1.494 3度 乾燥密度 (g/cm ³) 1.087 1.480 1.087 1.480 1.526 1.613	位置 0.250 0.750 1.151 1.551 2.051 2.650 4.163 位置 0.251 0.752 1.253 1.753	メモ リング滑り 供試体浮き上がり 供試体浮き上がり 供試体浮き上がり	特記事項 <u>ブレード加熱変色 水 分素数多いと考えられ、</u> 端面変色部あり 特記事項
1 2 3 4 5 6 7 No.10 1 2 3 3 4 4 5	厚み(mm) 0.500 0.500 0.500 0.500 0.698 2.328 KPDS-HP2 厚み(mm) 0.501 0.502 0.500 0.500 0.500 0.499	体積(cm ³) 1.413 1.413 1.413 1.413 1.413 1.413 1.973 6.578 NaCl 0.1mo 体積(cm ³) 1.416 1.419 1.413 1.413 1.413 1.413	究策判 究策判 切斯直後の 重量(g) 1.693 2.671 1.218 2.362 2.877 3.199 11.766 文策前 切斯直後の 重量(g) 1.985 2.554 2.620 2.686 1.988 3.588 3.588 3.5 3.5	乾燥後の重 量(g) 1.3045 2.2357 1.0865 2.1081 2.5197 2.8409 9.9245 乾燥後の重 量(g) 1.6674 2.3747 1.8411	乾燥後 減量率 22.9% 10.3% 10.8% 10.8% 10.8% 10.8% 10.8% 10.8% 10.8% 10.8% 11.2% 15.7% 乾燥後 減量率 16.0% 14.4% 13.4% 11.6% 11.6% 11.6% 11.6% 11.6% 11.6% 11.6%	洗净前密度 0.923 1.582 1.277 1.492 1.783 1.440 1.509 洗净前密度 1.544 1.509 1.544 1.540 1.541 1.541 1.541 1.506	分割 分割後の重量 (g) 0.7606 1.0428 0.3606 0.8332 1.1686 1.3363 1.601 分割 分割後の重量 (g) 0.7286 1.0721 1.0257 1.0832 0.7976	分割率 58.3% 46.6% 33.2% 39.5% 46.4% 47.0% 16.1% 16.1% 分割率 43.3% 49.2% 45.2% 45.2% 45.2% 43.3%	洗済 重量(g) 0.7178 1.0077 0.2872 0.7848 1.1234 1.2878 1.5852 重量(g) 0.6726 1.0339 0.9750 1.0394 0.7567	後 減量率 5.6% 3.4% 20.4% 5.8% 3.9% 3.6% 1.0% 減量率 7.7% 4.1% 4.9% 4.1% 5.1%	乾燥6 全重量 (g) 1.231 2.160 0.865 1.986 2.233 9.827 乾燥6 全重量 (g) 1.539 2.100 2.157 2.279 1.747	2度 乾燥密度 (g/cm ³) 0.871 1.529 1.017 1.405 1.714 1.388 1.494 32度 乾燥密度 (g/cm ³) 1.087 1.480 1.526 1.513 1.238	位置 0.250 0.750 1.151 1.551 2.051 2.650 4.163 位置 0.251 0.752 1.253 1.753 2.253	メモ リング滑り 供試体浮き上がり 供試体浮き上がり メモ メモ 試料面乾燥	特記事項 <u>フレード加熱変色 水 分差数多いと考えられ、</u> 成面変色部あり 特記事項 前層より乾燥
1 2 3 4 5 6 7 7 No.10 1 2 3 3 4 5 6	厚み(mm) 0.500 0.500 0.500 0.500 0.500 0.500 0.698 2.328 KPDS-HP2 厚み(mm) 0.501 0.502 0.500 0.500 0.501 0.502 0.500 0.509 0.251	体積(cm ³) 1.413 1.413 0.851 1.413 1.413 1.413 1.413 1.413 1.413 1.416 1.416 1.419 1.413 1.413 1.413 1.413 1.410 0.709	乾廃町 乾廃町 均断直後の 重量(g) 1.693 2.671 1.218 2.362 2.877 3.199 11.766 以 乾燥前 切断直後の 重量(g) 1.985 2.554 2.656 1.988 1.213	乾燥後の重 量(g) 1.3045 2.2357 1.0865 2.1081 2.5197 2.8409 9.9245 乾燥後の重 量(g) 1.6674 2.194 1.6674 2.3747 1.8411 1.1205	乾燥後 減量率 22.9% 16.3% 10.8% 10.7% 10.7% 11.2% 15.7% 乾燥後 減量率 16.0% 14.3% 11.6% 14.3% 11.6% 7.4% 7.4%	洗浄前密度 0.923 1.582 1.277 1.492 1.783 1.440 1.509 洗净前密度 1.178 1.544 1.606 1.681 1.306	分割 分割後の重量 (g) 0.7606 1.0428 0.3606 0.8332 1.1686 1.3363 1.601 分割後の重量 (g) 0.7286 1.0781 1.0257 1.0832 0.7976 0.4225		洗済 重量(g) 0.7178 1.0077 0.2872 0.7848 1.1234 1.2878 1.5852 重量(g) 0.6726 1.0339 0.9750 1.0394 0.7567 0.3972	後 減量率 5.6% 3.4% 5.8% 3.9% 3.6% 1.0% 7.7% 4.1% 4.9% 4.9% 5.1% 6.0%	乾燥8 全重量 (g) 1.231 2.160 0.865 1.986 2.422 2.738 9.827 乾燥8 全重量 (g) 1.539 2.100 2.157 2.279 1.747 1.053	3度 乾燥密度 (g/cm ³) 0.871 1.529 1.017 1.405 1.714 1.388 1.494 3 乾燥密度 g/cm ³) 1.087 1.613 1.526 1.613 1.235 1.485	位置 0.250 0.750 1.151 1.551 2.650 4.163 位置 0.251 0.752 1.253 1.753 2.628	メモ リング滑り 供試体浮き上がり 供試体浮き上がり メモ 」 メモ 」 ノレード逃げ	特記事項 フレード加熱変色 水 <u>分置数多いと考えられ</u> スライス前供試体 端面変色部あり 特記事項 <u>前層より乾燥</u> 明らかに乾燥
1 2 3 4 5 6 7 No.10	厚み(mm) 0.500 0.500 0.500 0.500 0.500 0.698 2.328 KPDS-HP2 厚み(mm) 0.501 0.500 0.500 0.500 0.500 0.500 0.499 0.251 2.365	体積(cm ³) 1.413 1.413 0.851 1.413 1.413 1.413 1.413 1.413 1.413 1.414 1.414 1.416 1.419 1.413 1.413 1.413 1.413 1.413 0.709 6.683	(究策)可 (切斯直後の 重量(g) 1,693 2,671 1,218 2,362 2,877 3,199 11,766 (/) 乾燥前 切斯直後の 重量(g) 1,985 2,554 2,620 2,686 1,988 1,213 11,922		乾燥後 減量率 22.9% 16.3% 10.8% 10.7% 10.8% 11.2% 15.7% 乾燥後 減量率 16.0% 14.3% 13.4% 14.3% 14.3% 14.4% 14.0%	洗净前密度 0.923 1.562 1.277 1.492 1.783 1.440 1.509 洗净前密度 1.178 1.544 1.606 1.580 1.535	分割 分割後の重量 (g) 0.7606 1.0428 0.3606 1.3363 1.601 分割後の重量 (g) 0.7286 1.0781 1.0257 1.0832 0.7976 0.4255 1.0853	分割率 58.3% 46.6% 33.2% 39.5% 46.4% 47.0% 16.1% 16.1% 47.0% 47.2% 49.2% 43.7% 49.2% 45.6% 43.3% 37.7% 10.6%	洗済 重量(g) 0.7178 1.0077 0.2872 0.7848 1.1234 1.2878 1.5852 重量(g) 0.6726 1.0339 0.9750 1.0394 0.3972 1.0394	後 減量率 5.6% 3.4% 20.4% 5.8% 3.9% 3.6% 1.0% 7.7% 4.1% 4.9% 4.9% 5.1% 6.0% 4.7%	乾燥8 全重量 (g) 1.231 2.160 0.865 1.986 2.422 2.738 9.827 乾燥8 (g) 1.539 2.100 2.157 2.279 1.747 1.053 9.773	3度 乾燥密度 (g/cm ³) 0.871 1.529 1.017 1.405 1.714 1.388 1.494 乾燥密度 (g/cm ³) 1.087 1.687 1.687 1.613 1.526 1.613 1.480 1.525 1.462	位置 0.250 0.750 1.151 1.551 2.650 4.163 位置 0.251 0.752 1.253 1.753 2.253 2.628 3.936	メモ リング滑り 供試体浮き上がり 供試体浮き上がり メモ ジ料面乾燥 ブレード逃げ	特記事項 <u> ブレード加熱変色 * 分蒸散多いと考えられ</u> スライス前供試体 端面変色部あり 特記事項 前層より乾燥 明らかに乾燥
1 2 3 4 5 6 6 7 No.10 1 2 3 4 4 5 6 6 7 No.2	厚み(mm) 0.500 0.500 0.301 0.500 0.698 2.328 KPDS-HP2 厚み(mm) 0.501 0.502 0.500 0.500 0.499 0.251 2.365 KPCa	体積(cm ²) 1.413 1.413 0.851 1.413 1.973 1.413 1.973 6.578 NaCl 0.1mo 体積(cm ²) 1.416 1.419 1.413 1.413 1.413 1.413 1.413 CaCl2	(究策) (切斯直後の 重量(g) 1.693 2.671 1.218 2.862 2.877 3.199 1.1766 (/) 乾燥前 切斯直後の 重量(g) 9.554 2.554 2.655 2.5554 2.660 1.988 1.1988 1.213 1.1982		乾燥後 減量率 22.9% 16.3% 10.8% 10.8% 10.8% 10.8% 11.0% 第 11.0% 第 後 後 減量率 16.0% 14.3% 13.4% 11.6% 7.4% 7.6% 14.0%	洗净前密度 0.923 1.582 1.277 1.492 1.773 1.440 1.509 洗净前密度 1.178 1.544 1.606 1.681 1.306 1.535	分割 分割後の重量 (g) 0.7606 1.0428 0.3606 0.8332 1.1886 1.3363 1.601 分割後の重量 (g) 0.7286 1.0781 1.0257 1.0852 0.7976 0.4225 1.0853	分割率 58.3% 46.6% 33.2% 39.5% 46.4% 47.0% 16.1% 16.1% 分割率 43.7% 49.2% 43.7% 49.2% 43.3% 37.7% 10.6%	洗済 重量(g) 0.7178 1.0077 0.2872 0.7848 1.1234 1.2878 1.5852 重量(g) 0.6726 1.0339 0.9750 1.0394 0.7567 0.3972 1.0341	後 減量率 5.6% 3.4% 20.4% 5.8% 3.9% 3.3.6% 1.0% 減量率 7.7% 4.1% 4.0% 5.1% 6.0% 4.0%	乾燥6 全重量 (g) 1,231 2,160 0,865 1,986 2,422 2,738 9,827 8,827 2,273 8,827 2,153 9,210 2,160 2,157 2,279 1,747 1,053 9,773	3度 乾燥密度 (g/cm ³) 1.529 1.529 1.529 1.405 1.714 1.388 1.494 3度 乾燥密度 (g/cm ³) 1.087 1.480 1.526 1.613 1.239 1.485 1.485 1.485	位置 0.250 0.750 1.151 1.551 2.650 4.163 位置 0.251 0.752 1.253 1.753 2.628 3.936	メモ リング滑り 供試体浮き上がり 供試体浮き上がり 供試体浮き上がり メモ 」 メモ 」 」 ノレード逸げ	特記事項 ブレード加熱変色 水 <u>ク活数多いと考えられ、</u> スライス前代試体 端面変色部あり 特記事項 前層より乾燥 明らかに乾燥
1 2 3 4 5 6 7 No.10 1 1 2 3 3 4 5 6 7 7 No.2	厚み(mm) 0.500 0.500 0.500 0.500 0.698 2.328 KPDS-HP2 厚み(mm) 0.501 0.502 0.500 0.500 0.499 0.251 2.365 KPCa	体積(cm ²) 1.413 1.413 1.413 1.413 1.413 1.413 1.973 6.578 NaCl 0.1mo 体積(cm ²) 1.416 1.419 1.413 1.413 1.413 1.413 1.413 1.413 1.413 1.413 1.413 1.413 1.413 1.413 1.414 1.413 1.414 1.415 1.416 1.413 1.415 1.	究策判 究策判 公開直後の 重量(g) 1.693 2.671 1.218 2.362 2.877 3.199 11.766 (√) 乾燥前 1.985 2.554 2.620 2.686 1.986 1.213 11.922 乾燥前 乾燥前	乾燥後の重 量(g) 1.3045 2.2357 1.0865 2.1081 2.5197 2.8409 9.9245 乾燥後の重 量(g) 1.6674 2.19 2.2690 2.3747 1.3411 1.1205 10.2569	乾燥後 減量率 22.9% 10.3% 10.8% 10.8% 10.8% 10.8% 10.8% 11.2% 11.2% 11.2% 11.2% 11.2% 11.2% 11.6%11.6% 11.6% 11.6% 11.6% 11.6% 11.6% 11.6% 11.6% 11.6% 11.6% 11.	洗净前密度 0.923 1.582 1.277 1.492 1.783 1.440 1.509 洗净前密度 1.544 1.606 0.681 1.580 1.535	分割 分割後の重量 (g) 0.7606 1.0428 0.3606 0.3302 1.1686 1.3363 1.601 分割後の重量 (g) 0.7286 1.0781 1.0257 1.0832 0.7976 0.4225 1.0853	分割率 58.3% 46.6% 33.2% 39.5% 46.4% 47.0% 16.1% 16.1% 分割率 43.7% 49.2% 45.2% 45.2% 45.3% 43.3% 37.7% 10.6%	洗浄 重量(g) 0.7178 1.0077 0.2872 0.7848 1.1234 1.2878 1.5852 重量(g) 0.6726 1.0339 0.9750 1.0394 0.7567 0.3972 1.0341	後 減量率 5.6% 3.4% 20.4% 5.8% 3.9% 3.6% 1.0% 減量率 7.7% 4.1% 4.9% 4.0% 5.1% 6.0% 4.7%	乾燥6 全重量 (g) 1.231 2.160 0.865 1.986 2.422 2.738 9.827 乾燥8 全重量 (g) 1.539 2.100 2.157 2.279 1.053 9.773 9.773	3度 乾燥密度 (g/cm ³) 0.871 1.529 1.017 1.405 1.714 1.388 1.494 3度 乾燥密度 (g/cm ³) 1.087 1.485 1.613 1.526 1.613 1.239 1.485 1.462 3度	位置 0.250 0.750 1.151 1.551 2.051 2.650 4.163 位置 0.251 0.752 1.253 1.753 2.2553 2.2628 3.936	メモ リング滑り 供試体浮き上がり 供試体浮き上がり メモ メモ ゴレード逃げ	特記事項 フレード加熱変色 <u>水 分差数多いと考えられ、</u> 成面変色部あり 特記事項 前層より乾燥 明らかに乾燥
1 2 3 4 5 6 6 7 No.10	厚み(mm) 0.500 0.500 0.500 0.500 0.500 0.698 2.328 KPDS-HP2 厚み(mm) 0.501 0.502 0.500 0.500 0.500 0.500 0.251 2.365 KPCa 厚み(mm)	体積(cm ³) 1.413 1.413 0.851 1.413 1.413 1.413 1.413 1.413 1.413 1.416 1.419 1.413 1.413 1.413 1.413 1.413 1.413 1.413 1.413 1.414 1.413 1.414 1.415 4.41	乾廃町 切斯直後の <u>重量(g)</u> 1.693 2.671 1.218 2.362 2.877 3.199 11.766 //1 乾燥前 切斯直後の 2.656 1.985 2.554 2.620 2.686 1.985 1.213 1.1922 乾燥前 切斯直後の 3.193 1.935 2.554 2.554 3.54 3.54 3.54 3.54 3.54 3.55 3	乾燥後の重 量(g) 1.3045 2.2357 1.0865 2.1081 2.5197 2.6409 9.9245 乾燥後の重 量(g) 1.6674 2.19 2.2690 2.3747 1.8474 1.1205 10.2569 乾燥後の重	乾燥後 減量率 22.9% 16.3% 10.8% 10.7% 10.2% 11.2% 11.2% 11.2% 15.7% 乾燥後 減量率 16.0% 14.3% 14.3% 14.3% 14.4% 14.6% 7.6% 7.6% 7.6% 7.6% 7.6% 7.6% 7.6% 7	洗净前密度 0.923 1.582 1.277 1.492 1.783 1.440 1.509 洗净前密度 1.178 1.544 1.606 1.681 1.535	分割後の重量 (g) 0.7606 1.0428 0.3606 0.8332 1.1686 1.3363 1.601 分割後の重量 (g) 0.7286 0.7286 1.0781 1.0257 1.0832 0.7976 0.4225 1.0853 分割後の重量 分割後の重量	分割率 58.3% 46.6% 33.2% 39.5% 46.4% 47.0% 16.1% → 16.1% → 23.5% 45.2% 45.2% 45.2% 45.2% 45.3% 37.7% 10.6%	洗済 重量(g) 0.7178 1.0077 0.2872 0.7848 1.1234 1.2278 1.5852 重量(g) 0.6726 1.0339 0.9750 1.0394 0.3972 1.0391 1.0394 1.03972 1.0391 1.0394	後 減量率 5.6% 3.4% 20.4% 5.8% 3.9% 3.6% 1.0% 7.7% 4.1% 4.9% 4.9% 4.0% 5.1% 6.0% 4.7%	乾燥8 全重量 (g) 1.231 2.160 0.865 1.986 2.238 9.827 乾燥8 (g) 1.539 2.100 2.157 2.279 1.539 2.107 2.177 2.279 1.539 2.107 2.177 2.279 2.177 2.279 2.7	3度 乾燥密度 (g/cm ³) 0.871 1.529 1017 1.405 1.714 1.388 1.494 32 乾燥密度 (g/cm ³) 1.087 1.480 1.526 1.613 1.485 1.462 32 乾燥密度 乾燥密度	位置 0.250 0.750 1.151 1.551 2.051 2.650 4.163 位置 0.251 0.752 1.253 1.753 2.253 2.253 2.628 3.936 位置	メモ リング湯り 供試体浮き上がり 供試体浮き上がり メモ ゴレード遠げ メモ	特記事項 フレード加熱変色 水 <u>分蒸散多いと考えらん</u> 端面変色部あり 特記事項 <u>前層より乾燥</u> 明らかに乾燥
1 2 3 4 5 6 7 No.10 1 1 2 2 3 3 4 4 5 6 6 7 No.2	厚み(mm) 0.500 0.500 0.301 0.500 0.698 2.328 KPDS-HP2 厚み(mm) 0.501 0.502 0.500 0.500 0.500 0.499 0.2385 KPCa	体積(cm ³) 1.413 1.413 0.851 1.413 1.413 1.973 6.578 NaCl 0.1mo 体積(cm ³) 1.416 1.419 1.413 1.413 1.413 1.413 CaCl2 体積(cm ²)	究策判 究策判 切斯直後の 重量(g) 1,693 1,693 2,671 1,218 2,362 2,877 3,199 11,766 // 乾燥前 切斯直後の 重量(g) 1,985 2,554 2,620 2,666 1,986 1,986 1,988 1,1922 乾燥前 切斯直後の 重量(g)	乾燥後の重 量(g) 1.3045 2.2357 1.0865 2.1081 2.5197 2.8409 9.9245 9.9245 9.9245 1.6674 2.2690 2.3747 1.8411 1.1205 10.2569 乾燥後の重 量(g)	乾燥後 減量率 22.9% 16.3% 10.8% 10.8% 10.8% 11.08% 11.08% 11.05% 11.05% 14.3% 14.3% 14.4% 14.6% 16.6% 14.6%	洗浄前密度 0.923 1.582 1.277 1.492 1.783 1.440 1.509 洗浄前密度 1.178 1.544 1.506 1.535 光浄前密度	分割 分割後の重量 (g) 0.7606 1.0428 0.3606 0.8332 1.1686 1.3363 1.301 分割後の重量 (g) 0.7286 1.0781 1.0257 1.0832 0.7976 0.4225 1.0853 分割後の重量 (g) 分割後の重量 (g)	分割率 58.38 46.65 33.25 39.5% 46.45 47.05 16.15 分割率 43.7% 49.2% 45.6% 37.7% 10.6% 分割率	洗浄 重量(g) 0.7178 1.0077 0.2872 0.7848 1.1234 1.2878 1.5852 重量(g) 0.6726 1.0339 0.9750 1.0394 0.7567 0.3972 1.0374 1.0392 1.0391 1.0392 1.0391 1.0392 1.0391 1.0392 1.0392 1.0391 1.0392 1.0394 1.0392 1.0392 1.0392 1.0392 1.0392 1.0394 1.0394 1.0392 1.0394 1.0394 1.0394 1.0392 1.0394 1.0394 1.0392 1.0394 1.0394 1.0394 1.0394 1.0392 1.0394	後 減量率 5.6% 3.4% 20.4% 5.8% 3.9% 3.6% 1.0% 3.6% 1.0% 3.9% 4.0% 4.0% 4.0% 5.1% 6.0% 4.7% 8.0% 4.7%	乾燥6 全重量 (g) 1.231 2.160 0.865 1.986 2.422 2.738 9.827 乾燥程 全重量 (g) 1.539 2.100 2.157 2.279 1.747 1.053 9.773 乾燥程 (g)	3度 乾燥密度 (g/cm ⁵) 0.871 1.529 1.017 1.405 1.714 1.388 1.494 32 乾燥密度 (g/cm ⁵) 1.613 1.613 1.239 1.485 1.465 32 50燥密度 (g/cm ⁵)	位置 0.250 0.750 1.151 2.051 2.650 4.163 位置 0.251 0.752 1.253 2.628 3.936 位置	メモ リング滑り 供試体浮き上がり 供試体浮き上がり 供試体浮き上がり メモ ジレード逃げ メモ メモ	特記事項 <u>ブレード加熱変色 水 ガ温数多いと考えられ</u> 端面変色部あり 特記事項 <u>前層より乾燥</u> 明らかに乾燥 特記事項
1 2 3 4 4 5 6 6 7 7 No.10 1 1 2 3 3 3 5 6 6 7 7 No.2	厚み(mm) 0.500 0.500 0.500 0.500 0.688 2.328 KPDS-HP2 厚み(mm) 0.501 0.502 0.500 0.500 0.500 0.251 2.365 KPCa 厚み(mm) 0.830	体積(cm ²) 1.413 1.413 0.851 1.413 1.973 6.578 NaCl 0.1mm 体積(cm ²) 1.416 1.419 1.413 1.413 1.413 1.413 1.413 1.413 1.413 1.413 1.414 0.709 6.683 CaCl2 体積(cm ²) 2.346	(究策判) (功斯直後の 重量(g) 1.693 2.671 1.218 2.362 2.877 3.199 1.766 (1.77 3.199 1.766 (1.985 2.554 2.4554 2.4564 1.985 2.4564 2.4566 1.986 1.986 1.213 11.922 文経時前 切断直後の 重量(g) 2.866 1.988 1.213 1.985 2.554 2.654 2.656 1.988 1.1.922 2.856 2.554 2.555 2.554 2.555 2.554 2.555 2.55	乾燥後の重 量(g) 1.3045 2.2357 1.0865 2.1081 2.5197 2.8409 9.9245 9.9245 乾燥後の重 量(g) 1.6674 2.19 2.2690 1.6674 2.19 1.2269 乾燥後の重 量(g) 3.2347 3.2385	乾燥後 減量率 22.9% 16.3% 10.8% 10.8% 10.8% 11.2% 11.2% 11.2% 減量率 16.0% 14.3% 14.3% 14.3% 14.3% 14.4% 7.6% 7.4% 7.6% 7.4% 7.6% 14.0%	洗浄前密度 0.923 1.582 1.277 1.492 1.783 1.440 1.509 光浄前密度 1.178 1.544 1.606 1.681 1.306 1.535 光浄前密度 1.335	分割 分割後の重量 (g) 0.7606 1.0428 0.3606 0.3302 1.1686 1.3363 1.601 分割後の重量 (g) 0.7286 1.0781 1.0257 1.0832 0.7976 0.4225 1.0853 分割後の重量 (g) 1.3635	分割率 58.3% 58.3% 46.6% 33.2% 39.5% 46.6% 33.2% 39.5% 46.6% 33.2% 39.5% 46.6% 47.0% 16.1% 分割率 43.7% 49.2% 45.6% 43.3% 37.7% 10.6% 分割率 42.0%	洗済 重量(g) 0.7178 1.0077 0.2872 0.7848 1.1234 1.2878 1.5852 重量(g) 0.6726 1.0339 0.9750 1.0341 重量(g) 1.2908	後 減量率 5.6% 3.4% 20.4% 5.8% 3.36% 1.0% 減量率 7.7% 4.1% 4.0% 5.1% 6.0% 4.7%	乾燥岳 全重量 (g) 1,231 2,160 0,865 1,986 2,422 2,738 9,827 乾燥岳 (g) 1,539 2,100 2,157 2,157 2,100 2,157 2,100 2,157 2,100 2,107 2,107 2,100 2,107 2,100 2,107 2,100 2,107 2,1	3度 乾燥密度 (g/cm ³) 1.529 1.017 1.405 1.714 1.388 1.494 3度 乾燥密度 (g/cm ³) 1.087 1.485 1.485 1.462 3度 乾燥密度 (g/cm ³) 1.485 1.462 3度 乾燥密度 1.485 1.462 3度	位置 0.250 0.750 1.151 1.551 2.051 2.650 4.163 位置 0.251 0.752 1.753 2.253 2.628 3.936 位置 0.415	メモ リング滑り 供試体浮き上がり 供試体浮き上がり メモ メモ メモ メレード逃げ メスス片実測	特記事項 フレード加熱変色。水 ク温数多いと考えられ、 第一 が一 が加熱変色が、 が フレード加熱変色が、 が なってスロードの が なってスロードの 、 ので、 ので、 ので、 ので、 ので、 ので、 ので、
1 2 3 4 4 5 6 6 7 No.10 1 2 3 3 4 4 5 6 6 7 No.2 No.2	厚み(mm) 0.500 0.500 0.500 0.500 0.698 2.328 KPDS-HP2 厚み(mm) 0.501 0.502 0.500 0.499 0.2511 2.365 KPCa 厚み(mm) 0.830 0.500 0.500	体積(cm ³) 1.413 1.413 1.413 1.413 1.413 1.973 6.578 NaCl 0.1mo 体積(cm ³) 1.416 1.419 1.413 1.415 1.416 1.413 1.413 1.416 1.413 1.413 1.416 1.413 1.413 1.413 1.416 1.413 1.413 1.416 1.413 1.413 1.413 1.416 1.413 1.	究策前 句斯直後の 重量(g) 1.693 2.6711 1.218 2.362 2.362 2.362 2.362 2.362 2.362 2.362 1.985 2.554 2.554 2.620 2.686 1.985 2.554 2.686 1.985 2.554 2.686 1.985 2.554 2.686 1.922 乾燥前 切断直後の 重量(g) 3.192 3.192 3.55 5.55	乾燥後の重 量(g) 1.3045 2.2357 1.0865 2.1081 2.5197 2.5409 9.9245 乾燥後の重 量(g) 1.6674 2.3747 1.8411 1.1205 10.2569 乾燥後の重 量(g) 3.2285 2.2117	乾燥後 減量率 22.9% 10.3% 10.8% 10.8% 10.2% 10.2% 11.2% 15.7% 乾燥後 減量率 16.0% 14.0% 14.0% 14.0% 14.0% 14.0% 14.0% 14.0% 14.0% 14.0% 14.0% 14.0% 16.7% 16.7% 16.7%	洗净前密度 0.923 1.582 1.277 1.492 1.783 1.440 1.509 洗净前密度 1.544 1.606 1.681 1.306 1.535 洗净前密度 1.535	分割後の重量 (g) 0.7606 1.0428 0.3606 0.8332 1.1686 1.3363 1.601 分割後の重量 (g) 0.7286 1.0257 1.0832 0.7276 0.4225 1.0853 分割後の重量 (g) 分割後の重量 (g) 1.3615 1.3615 1.3615 1.3615	分割率	洗済 重量(g) 0.7178 1.0077 0.2872 0.7848 1.1234 1.2278 1.5852 重量(g) 0.6726 1.0339 0.9750 1.0394 0.7567 0.3972 1.0341 重量(g) 1.2088 1.2298 1.2908	後 減量率 5.6% 3.4% 20.4% 5.8% 3.9% 3.6% 1.0% 就量率 7.7% 4.1% 4.9% 4.0% 5.1% 4.0% 5.1% 4.0% 5.1% 7.7% 4.7%	乾燥8 全重量 (g) 1.231 2.160 0.865 1.986 2.422 2.738 9.827 乾燥8 (g) 1.539 2.100 2.157 2.279 1.747 1.053 9.773 乾燥器 全重量 (g) 3.777 2.279 1.745 2.157 2.279 1.745 2.157 2.279 1.745 2.157 2.279 1.745 2.157 2.279 1.745 2.157 2.279 1.745 2.157 2.279 1.745 2.157 2.279 1.745 2.157 2.279 1.755 2.170 2.171 2.279 1.755 2.175 2.279 2.170 2.177 2.279 2.170 2.177 2.279 2.170 2.177 2.279 2.170 2.177 2.279 2.170 2.177 2.279 2.177 2.279 2.177 2.279 2.177 2.279 2.177 2.279 2.170 2.157 2.279 2.170 2.177 2.279 2.170 2.177 2.279 2.170 2.177 2.279 2.170 2.177 2.279 2.170 2.177 2.279 2.170 2.177 2.279 2.170 2.177 2.279 2.170 2.177 2.279 2.170 2.177 2.279 2.170 2.177 2.279 2.170 2.177 2.279 2.170 2.177 2.279 2.170 2.177 2.177 2.279 2.170 2.177 2.279 2.170 2.177 2.177 2.177 2.177 2.177 2.177 2.177 2.177 2.177 2.177 2.177 2.177 2.177 2.177 2.177 2.177 2.177 2.177 2.177 2.070 2.171 2.070 2.171	3度 乾燥密度 (g/cm ³) 0.871 1.529 1.017 1.405 1.714 1.388 1.494 32 乾燥密度 (g/cm ³) 1.087 1.485 1.462 1.485 1.462 82 乾燥密度 (g/cm ³) 1.308 1.485 1.485 1.462	位置 0.250 0.750 1.151 1.551 2.051 2.650 4.163 位置 0.251 0.752 1.253 1.753 2.628 3.936 位置 0.415 1.555	メモ リング滑り 供試体浮き上がり 供試体浮き上がり メモ メモ ブレード逸げ メモ スライス片実測	特記事項 フレード加熱変色、水 <u>ク温数多いと考えられ</u> スライス前候試体 端面変色部あり 特記事項 前層より乾燥 明らかに乾燥
1 2 3 3 4 5 6 7 No.10 1 2 3 3 4 5 5 6 7 No.2 05-01 05-03 05-05 0	厚み(mm) 0.500 0.500 0.500 0.500 0.500 0.500 0.500 KPDS-HP2 厚み(mm) 0.501 0.500 0.500 0.500 0.499 0.238 KPCa 厚み(mm) 0.501 0.500 0.	体積(cm ³) 1.413 1.413 0.851 1.413 1.413 1.413 1.413 1.413 1.416 1.419 1.416 1.419 1.413 1.415 1.41	究策前 印斯直後の 重量(g) 1.6933 2.671 1.218 2.362 2.877 3.199 11.766 // 乾燥前 切斯直後の 重量(g) 3.927 2.654 1.985 2.554 2.554 2.620 2.806 1.988 1.213 11.922 乾燥前 切斯直後の 重量(g) 3.927 2.656 2.808 2.3927 3.927 3	乾燥後の重 量(g) 1.3045 2.2357 1.0865 2.1081 2.5197 2.8409 9.9245 乾燥後の重 量(g) 1.6674 2.2690 2.3747 1.8411 1.1205 10.2569 乾燥後の重 量(g) 3.2385 2.2117 2.2587	乾燥後 減量率 22.9% 16.3% 10.8% 10.8% 11.08% 11.08% 11.05% 15.7% 15.7% 15.7% 15.7% 15.7% 15.7% 15.7% 15.7% 16.0% 14.0% 16.0% 14.0%	洗净前密度 0.923 1.582 1.277 1.492 1.783 1.440 1.509 洗净前密度 1.178 1.544 1.606 1.535 1.535 洗净前密度 1.331 1.565 1.535	分割 分割後の重量 (g) 0.7606 1.0428 0.3606 1.3363 1.3363 1.3363 1.601 分割後の重量 (g) 0.7286 1.0781 1.0257 1.0832 0.7976 0.4225 1.0832 0.7865 1.0685 1.2063 1.2063	分割率 58.38, 46.6%, 33.2%, 39.5%, 46.4%, 47.0%, 16.1%, 分割率 43.7%, 49.2%, 45.6%, 43.3%, 37.5%, 45.6%, 43.3%, 37.5%, 45.6%, 43.3%, 37.5%, 45.6%, 43.3%, 37.5%, 45.6%, 43.3%, 37.5%, 37.7%, 42.0%, 48.3%, 53.4%,	洗済 重量(g) 0.7178 1.0077 0.2872 0.7882 1.1234 1.2878 1.5852 重量(g) 0.6726 1.0339 0.9750 1.0394 0.7567 0.39750 1.0394 1.0341 重量(g) 1.2934 1.1284 1.1285 1.0341 1.2956 1.0484 1.11222 1.0484 1.11222 1.0484 1.11222 1.0484 1.11222 1.0484 1.11222 1.0484 1.11222 1.0484 1.11222 1.0484 1.0484 1.11222 1.0484 1.1122 1.0484 1.1122 1.0484 1.1122 1.0484 1.1122 1.0485 1.0	後 減量率 5.6% 3.4% 20.4% 5.8% 3.9% 3.6% 1.0% 7.7% 4.1% 4.0% 4.0% 5.1% 6.0% 5.1% 6.0% 5.2% 1.8% 2.0%	乾燥6 全重量 (g) 1.231 2.160 0.865 2.422 2.738 9.827 乾燥8 全重量 (g) 1.539 2.100 2.157 2.279 1.539 2.100 2.157 3.9,773 9.773 9.774 1.539 2.100 2.157 2.279 1.747 1.727 1.747 1.727 1.727 1.727 1.727 1.727 1.727 1.727 1.727 1.727 1.727 1.727 1.727 1.727 1.727 1.747 1.727 1.727 1.727 1.747 1.727 1.727 1.727 1.727 1.727 1.747 1.7277 1.7277 1.7277 1.7277 1.7277 1.7277 1.7277 1.7277 1.7277	3度 乾燥密度 (g/cm ³) 1.529 1.529 1.529 1.405 1.714 1.405 1.714 1.405 1.714 1.405 1.714 1.405 1.714 1.405 1.714 1.405 1.714 1.405 1.714 1.405 1.526 1.462	位置 0.250 0.750 1.151 2.051 2.650 4.163 位置 0.251 0.752 1.253 2.253 2.623 3.936 位置 0.415 1.585 2.589 2.589	メモ リング滑り 供試体浮き上がり 供試体浮き上がり 供試体浮き上がり メモ ブレード逃げ メモ スライス片実測	特記事項 フレード加熱変色 水 <u>分置数多いと考えられ</u> スライス前供試体 端面変色部あり 特記事項 前層より乾燥 明らかに乾燥 特記事項
1 2 3 3 4 5 6 7 No.10 1 2 3 4 5 6 6 7 No.2 0 5-01 0 5-05 0 1 5-05 0 5-05 0 5-05 0 1 5-05 0 1 5-05 0 5-05 0 1 5-05 0 1 5-05 0 1 5-05 0 1 5-05 0 1 5-05 1 5-05 1 5-05 1 5-05 1 5-05 1 5-05 1 5-05 1 5-05 1 5-05 1 5-05 1 5-05 1 5-05 1 5-05 1 5-05 1 1 5-05 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	厚み(mm) 0.500 0.500 0.500 0.500 0.698 2.328 KPDS-HP2 厚み(mm) 0.501 0.500 0.500 0.500 0.500 0.499 0.251 2.365 KPCa 厚み(mm) 0.830 0.508 0.	体積(cm ²) 1.413 1.413 0.851 1.413 1.413 1.973 6.578 NGC 0.1mm 体積(cm ²) 1.416 1.419 1.413 1.413 1.413 CaCl2 体積(cm ²) 2.346 1.413 1.414 1.415 1.41	(究策) (切斯直後の 重量(g) 1.693 2.671 1.218 2.362 2.877 3.199 位 1.766 (1.77 3.199 位 1.77 3.199 位 5.854 (1.78 5.2554 2.554 2.655 2.5554 2.656 1.998 1.1922 2.656 1.998 3.927 2.656 2.808 2.655 2.554	乾燥後の重 量(g) 1.3045 2.2357 1.0865 2.1081 2.5197 2.8409 9.9245 乾燥後の重 量(g) 1.6674 2.19 2.2690 2.3747 1.8411 1.1205 10.2569 乾燥後の重 量(g) 3.2385 2.2117 2.2587 2.2387 2.2387 2.2387	乾燥後 減量率 22.9% 16.3% 10.8% 10.8% 10.8% 10.8% 11.0% 第 16.0% 14.3% 11.5% 7.4% 7.6% 14.3% 7.4% 7.6% 7.4% 7.6% 11.6% 7.4% 7.6% 11.5% 15.9% 15.9%	洗浄前密度 0.923 1.582 1.277 1.492 1.773 1.440 1.509 洗浄前密度 1.178 1.544 1.606 1.535 洗子前密度 1.335 洗净前密度 1.381 1.565 1.573 1.579	分割 分割後の重量 (g) 0.7606 1.0428 0.3606 0.8332 1.1886 1.3363 1.601 分割後の重量 (g) 0.7286 1.0781 1.0257 1.0832 0.7976 0.4225 1.0853 分割後の重量 (g) 1.3615 1.3615 1.0689 (a) 1.3615 1.0689 (b) 1.3615 1.0689 (c) 1.3615 1.0689 1.0699 1.0699 1.0695 1.0655 1.0655 1.0655 1.0655 1.0655 1.0655 1.0655 1.0655 1.0655 1.0655 1.0655 1.0655	分割率 58.3% 58.3% 46.6% 33.2% 39.5% 46.4% 47.0% 16.1% 分割率 43.7% 49.2% 45.6% 43.3% 37.7% 10.6% 分割率 分割率 42.0% 48.3% 53.4% 48.0%	洗済 重量(g) 0.7178 1.0077 0.2872 0.7848 1.1234 1.1234 1.1234 1.5852 重量(g) 0.6726 1.0339 0.9750 1.0394 0.7567 0.3972 1.0341 重量(g) 1.2908 1.0484 1.1822 1.0484 1.1822 1.0472 1.0472	後 減量率 5.6% 3.4% 20.4% 5.8% 3.9% 1.0% 減量率 7.7% 4.1% 4.0% 5.1% 6.0% 5.1% 6.0% 4.7%	乾燥6 全重量 (g) 1,231 2,160 0,865 1,986 9,827 2,2738 9,827 2,2738 2,422 2,738 9,827 2,137 2,139 2,100 2,157 2,219 1,747 1,053 9,773 2,279 1,747 1,053 9,773 2,279 1,747 1,053 9,773 2,279 1,747 1,053 9,773 2,157 2,279 1,747 1,053 9,773 2,279 1,747 1,053 9,773 2,272 2,27	3度 乾燥密度 (g/cm ³) 0.871 0.871 1.529 1.017 1.405 1.714 1.388 1.494 3度 乾燥密度 (g/cm ³) 1.087 1.485 1.485 1.485 1.485 1.462 3度 乾燥密度 (g/cm ³) 1.485 1.485 1.485 1.485 1.485 1.462	位置 0.250 0.750 1.151 1.551 2.650 4.163 位置 0.251 0.752 1.253 1.753 2.628 3.936 位置 位置 0.415 1.585 2.589 4.585 2.595 2.595 2.595 2.595 2.595 2.595 2.595 2.595 2.595 2.595 2.595 2.595 2.595 2.595 2.595	メモ リング滑り 供試体浮き上がり 供試体浮き上がり 供試体浮き上がり 試料面乾燥 ブレード递げ メモ スライス片実測 1	特記事項 フレード加熱変色水 <u>スライス前代試体</u> 端面変色部あり 特記事項 前層より乾燥 明らかに乾燥
1 2 3 4 5 5 6 6 7 7 No.10 1 2 3 3 4 4 5 6 6 7 7 No.2	厚み(mm) 0.500 0.500 0.500 0.500 0.698 2.328 KPDS-HP2 厚み(mm) 0.501 0.502 0.500 0.499 0.2511 2.365 KPCa 厚み(mm) 0.830 0.500 0	体積(cm ²) 1.413 1.413 1.413 1.413 1.413 1.973 6.578 NaCl 0.1mo 体積(cm ²) 1.416 1.416 1.419 1.413 1.415 1.413 1.415 1.	究策判 句斯直後の 重量(g) 1.693 2.6711 1.218 2.362 2.877 3.199 11.766 (√) 乾燥前 切斯直後の 重量(g) 1.985 2.554 2.686 1.986 1.213 11.922 乾燥前 切斯直後の 重量(g) 3.927 2.656 2.656 2.653 2.653 2.655 2.654 3.927 3.927 3.927 3.927 3.927 3.927 3.927 3.927 3.927 3.927 3.927 3.927 3.927 3.927 3.927 3.927 3.927 3.92 3.927 3.	乾燥後の重 量(g) 1.3045 2.2357 1.0865 2.1081 2.5197 2.8409 9.9245 9.9245 乾燥後の重 量(g) 1.6674 2.19 2.2690 2.3747 1.8411 1.1205 10.2569 乾燥後の重 量(g) 3.2385 2.2117 2.2587 2.2307 4.4128 4.4028	乾燥後 減量率 22.9% 10.3% 10.8% 10.8% 10.8% 10.8% 10.8% 11.2% 10.8% 11.2% 11.2% 減量率 11.6% 11.6% 11.6% 11.6% 11.6% 11.6% 11.6% 11.6% 11.6% 11.5%	洗净前密度 0.923 1.582 1.277 1.492 1.783 1.440 1.509 洗净前密度 1.544 1.606 1.681 1.535 1.535 1.550 1.555 1.573 1.573	分割後の重量 (g) 0.7606 1.0428 0.3606 0.8332 1.1686 1.3363 1.601 分割後の重量 (g) 0.7286 1.0781 1.0257 1.0832 0.7286 1.0781 1.0257 1.0853 分割後の重量 (g) 1.3615 1.0688 1.2063 1.0699 0.9764 4.2055 1.0699 0.9764 4.2055 1.0699 0.9764 4.2055 1.0699 0.9764 4.2055 1.0699 0.9764 4.2055 1.0699 0.9764 4.2055 1.0699 0.9764 4.2055 1.0699 0.9764 4.2055 1.0699 0.9764 4.2055 1.0699 0.9764 4.2055 1.0699 0.9766 0.9765 1.2055 1.20555 1.20555 1.205555 1.2055555 1.205555555555555555555555555	分割率 58.3% 46.6% 33.2% 39.5% 46.4% 47.0% 16.1% 16.1% 分割率 43.7% 49.2% 45.2% 45.2% 45.2% 45.2% 45.2% 45.2% 45.3% 10.6% 分割率 42.0% 48.3% 53.4% 48.3% 53.4% 48.3%	洗済 重量(g) 0.7178 1.0077 0.2872 0.7848 1.1234 1.2278 1.5852 重量(g) 0.6726 1.0339 0.9750 1.0394 0.7567 0.3972 1.0341 重量(g) 1.2208 1.24988 1.249888 1.2498888 1.249888 1.249888888888 1.249888888888888888888888888888	後 減量率 5.6% 3.4% 20.4% 5.8% 3.9% 3.6% 1.0% 減量率 7.7% 4.1% 4.9% 4.0% 5.1% 4.0% 5.1% 4.0% 5.1% 2.0% 2.0% 2.1% 2.0% 2.1%	乾燥岳 全重量 (g) 1.231 2.160 0.865 1.986 2.422 2.338 9.827 0.1539 2.100 2.157 2.279 1.539 2.100 2.157 2.279 1.747 1.053 9.773 乾燥岳 全重量 (g) 1.747 1.053 9.773 乾燥岳 2.100 2.157 2.279 2.100 2.157 2.279 2.100 2.157 2.279 2.100 2.157 2.279 2.100 2.157 2.279 2.100 2.157 2.279 2.100 2.157 2.279 2.100 2.157 2.279 2.100 2.157 2.279 2.279 2.100 2.157 2.279 2.100 2.157 2.279 2.100 2.157 2.279 2.279 2.100 2.157 2.279 2.100 2.157 2.279 2.100 2.157 2.279 2.100 2.157 2.279 2.100 2.157 2.279 2.100 2.157 2.279 2.100 2.157 2.279 2.100 2.157 2.279 2.171 2.279 2.100 2.171 2.274 2.274 2.274 2.274 2.274 2.274 2.274 2.275 2.275 2.279 2.100 2.177 2.279 2.100 2.177 2.279 2.100 2.177 2.279 2.100 2.177 2.279 2.100 2.177 2.279 2.100 2.177 2.279 2.279 2.100 2.177 2.279 2.274 2.177 2.274 2.274 2.177 2.274 2.274 2.274 2.177 2.274	3度 乾燥密度 (g/cm ³) 0.871 1.529 1.017 1.405 1.714 1.388 1.494 32度 乾燥密度 (g/cm ³) 1.087 1.485 1.485 1.485 1.485 1.485 1.485 1.485 1.485 1.485 1.485 1.526 1.537 1.537 1.542 1.548 1.518 1.518	位置 0.250 0.750 1.151 1.551 2.051 2.650 4.163 位置 0.251 0.752 1.253 1.753 2.253 2.2628 3.936 位置 0.415 1.585 2.589 4.595 6.846	メモ リング滑り 供試体浮き上がり 供試体浮き上がり メモ ゴレード逃げ メモ スライス片実測 12:切断抵抗増大 10:40時抵抗増大	特記事項 フレード加熱変色 水 <u>ク温数多いと考えられ</u> 残面変色部あり 特記事項 <u>前層より乾燥</u> 明らかに乾燥
1 2 3 3 4 5 6 6 7 7 No.10 1 2 2 3 3 4 4 5 5 0 5 0 9 0 5 0 5 0 5 0 5 0 5 0 5 0 5	厚み(mm) 0.500 0.500 0.500 0.500 0.500 0.698 2.328 KPDS-HP2 厚み(mm) 0.501 0.502 0.500 0.500 0.499 0.251 2.365 KPCa 厚み(mm) 0.500 0.	体積(cm ³) 1.413 1.413 0.851 1.413 1.413 1.413 1.413 1.413 1.413 1.413 1.416 1.419 1.416 1.419 6.683 CaCl2 体積(cm ³) 6.683 CaCl2	究策前 句斯直後の 重信(2) 1.693 2.671 1.218 2.362 2.877 3.199 11.766 (/) 乾燥前 切斯直後の 重信(2) 2.866 1.985 2.554 2.554 2.656 2.808 1.922 文燥前 切斯直後の 重量(g) 3.927 2.656 2.808 2.808 2.653 5.283 4.872 2.654 5.283 4.872 5.987 5.283 5.28 5.28 5.28 5.28 5.28 5.28 5.28 5.28 5.28 5.28 5.28 5.28 5.28 5.28 5.28 5.28 5.28 5.28	乾燥後の重 量(g) 1.3045 2.2357 1.0865 2.1081 2.5197 2.8409 9.9245 乾燥後の重 量(g) 1.6674 2.5690 2.3747 1.8411 1.1205 10.2569 乾燥後の重 量(g) 3.2385 2.2117 2.2587 2.2307 4.4128 4.3032 (乾燥後 減量率 22.9% 16.3% 10.8% 10.0% 10.7% 11.2% 15.7% 乾燥後 減量率 16.0% 14.3% 14.3% 14.3% 14.3% 14.3% 14.0% 1	洗净前密度 0.923 1.562 1.277 1.492 1.783 1.440 1.509 洗净前密度 1.178 1.544 1.606 1.580 1.535 1.535 1.533 1.579 1.560 1.523	分割 分割後の重量 (g) 0.7606 1.0428 0.3606 1.0428 0.3302 1.1686 1.3363 1.301 分割後の重量 (g) 0.7286 1.0781 1.0257 1.0832 0.7976 0.4225 1.0832 0.7976 0.4255 1.0683 1.2063 1.2063 1.2063 1.2063	分割率 58.3% 46.6% 33.2% 39.5% 46.4% 47.0% 16.1% 分割率 43.7% 49.2% 43.7% 49.2% 43.3% 33.5% 10.6% 分割率 42.0% 48.3% 53.4% 48.0% 22.1% 28.6%	洗済 重量(g) 0.7178 1.0077 0.2872 0.7848 1.1234 1.2278 1.5852 重量(g) 0.6726 1.0339 0.9750 1.0394 0.7567 0.3972 1.0394 1.2908 1.0394 1.2908 1.0484 1.1822 1.0472 0.0572	後 減量率 5.6% 3.4% 20.4% 5.8% 3.9% 3.6% 1.0% 7.7% 4.1% 5.1% 6.0% 4.7% 8 0.0% 5.1% 6.0% 4.7% 7 2.1% 2.2% 2.1% 2.7% 2.1% 2.7%	乾燥香 全重量 (g) 1.231 2.160 0.865 1.986 2.422 2.738 9.827 乾燥香 (g) 1.539 2.100 2.157 2.279 1.539 2.107 2.279 1.539 2.107 2.177 2.279 1.539 2.107 2.177 2.279 1.539 2.107 2.170 2.170 2.170 2.171 2.279 1.539 2.170 3.070 2.170 2.170 3.070 2.170 2.170 3.070 2.170 2.170 3.070 2.170 2.170 3.070 2.170 3.070 2.180 3.070 2.180 3.070 2.180 3.070 2.180 3.070 2.180 3.070 2.180 3.070 3.0	3度 乾燥密度 (g/cm ³) 0.871 1.529 1017 1.405 1.714 1.388 1.494 32 乾燥密度 (g/cm ³) 1.087 1.485 1.485 1.462 32 乾燥密度 (g/cm ³) 1.309 1.526 1.485 1.485 1.462 32 1.542 1.545 1.514 1.545 1.54	位置 0.250 0.750 1.151 1.551 2.051 2.650 4.163 位置 0.251 0.752 1.253 2.253 2.253 2.253 3.936 位置 0.415 1.585 2.589 4.595 6.846 10.846 14.946	メモ リング滑り 供試体浮き上がり 供試体浮き上がり 供試体浮き上がり メモ ブレード逃げ メモ スライス片実測 12:切断抵抗増大 16:操作ミス、再設置	特記事項 フレード加熱変色 水 <u>分産数多いと考えられ</u> スライス前供試体 端面変色部あり 特記事項 前層より乾燥 明らかに乾燥
1 1 2 3 3 4 5 6 6 7 No.10 1 2 3 3 4 5 5 6 6 7 No.2 05-01 05-03 05-05 05-09 10-05 01-00 10-05 05-01 0-05 05-01 0-05 05-01 0-05 05-05 0	厚み(mm) 0.500 0.500 0.500 0.500 0.698 2.328 KPDS-HP2 厚み(mm) 0.501 0.502 0.500 0.500 0.500 0.499 0.251 2.365 KPCa 厚み(mm) 0.830 0.508 0.500 0.508 0.500 0.508 0.500 0.508 0.500 0.508 0.500 0.500 0.500 0.251 0.251 0.250 0.251 0.250 0.500 0.	体積(cm ²) 1.413 1.413 1.413 1.413 1.973 6.678 NaCl 0.1mmo 休積(cm ²) 1.416 1.419 1.416 1.419 1.413 1.410 0.6833 CaCl2 休積(cm ²) 2.346 1.413 1.413 1.413 2.829 2.826 0.775 0.857 0	(究際町) (切斯直後の 重量(g) 1.693 2.671 1.218 2.877 3.199 (小 1.766 (小 1.766 1.77 3.199 (小 乾燥前) 切斯直後の 重量(g) 1.985 2.554 2.654 2.620 2.866 1.988 1.1922 2.656 3.927 2.656 2.808 2.653 5.283 4.872 2.803	乾燥後の重 量(g) 1.3045 2.2357 1.0865 2.1081 2.5197 2.8409 9.9245 乾燥後の重 量(g) 1.6674 2.19 2.2690 0.23747 1.8411 1.1205 10.2569 乾燥後の重 量(g) 3.2385 2.2117 2.2587 2.2307 4.4128 4.3032 4.3386 9.7265	較課後 減量率 22.9% 16.3% 10.8% 10.8% 10.8% 10.8% 10.8% 11.2% 11.5.% 12.4% 11.5.% 12.4% 11.5.% 14.3% 14.3% 14.3% 14.3% 14.3% 14.6% 15.9% 15.9% 15.5% 16.5% 15.5% 16.5% 15.5%	洗浄前密度 0.923 1.582 1.277 1.492 1.773 1.440 1.509 洗浄前密度 1.544 1.544 1.506 1.535 洗浄前密度 1.381 1.565 1.573 1.579 1.560 1.520	分害 分割後の重量 (g) 0.7606 1.0428 0.3606 1.3363 1.601 分割後の重量 (g) 0.7286 1.0781 1.0257 1.0832 0.7976 0.4225 1.0853 分割後の重量 (g) 1.3615 1.0853 分割後の重量 (g) 1.3615 1.0653 1.0659 0.9764 1.2217 1.0876	分割率 58.3% 58.3% 46.6% 33.2% 39.5% 46.4% 47.0% 16.1% 分割率 43.7% 49.2% 43.7% 49.2% 43.7% 10.6% 33.7% 10.6% 33.3% 37.7% 10.6% 33.4% 42.0% 48.0% 22.1% 28.6% 22.1% 28.6%	洗済 重量(g) 0.7178 1.0077 0.2872 0.7848 1.1234 1.2878 1.5852 重量(g) 0.6726 1.0339 0.9750 1.0394 0.7567 0.3972 1.0341 1.2808 1.0484 1.1822 1.0484 1.1822 1.0472 0.9507 1.1045 0.6572	後 減量率 5.6% 3.4% 20.4% 3.9% 3.9% 3.9% 3.6% 1.0% 7.7% 4.1% 4.0% 5.1% 6.0% 5.1% 6.0% 5.1% 6.0% 5.1% 6.0% 2.1% 2.2% 1.8% 2.2% 1.8% 2.7% 1.9% 2.7% 2.7% 5.4%	乾燥6 全重量 (g) 1,231 2,160 0,865 1,986 2,422 2,738 9,827 乾燥6 全重量 (g) 1,539 2,100 2,157 2,279 1,747 1,053 9,773 2,079 1,747 1,053 9,773 2,171 2,279 1,747 1,053 9,773 2,171 2,274 2,183 4,284 4,229 4,220 2,264 2,273 2,275 2,2	3度 乾燥密度 (g/cm ³) 1.529 1.017 1.529 1.017 1.405 1.714 1.388 1.494 3度 乾燥密度 (g/cm ³) 1.087 1.480 1.526 1.613 1.485 1.485 1.485 1.485 1.485 1.526 5.26 乾燥密度 (g/cm ³) 1.527 1.537 1.545 1.518 1.515 1.515	位置 0.250 0.750 1.151 1.551 2.650 4.163 位置 0.251 0.752 1.253 1.753 2.628 3.936 位置 0.415 1.589 4.595 6.840 10.846 10.846 10.846	メモ リング滑り 供試体深き上がり 供試体深き上がり 供試体深き上がり 成料面乾燥 ブレード逸げ メモ スライス片実測 12:切断抵抗増大 16:操作ミス、再設置	特記事項 ブレード加熱変色 水 <u>ク活数多いと考えられ、</u> スライス前代試体 端面変色部あり 特記事項 前層より乾燥 明らかに乾燥



図 3.3.4-15 密度分布(1)



図 3.3.4-16 密度分布(2)





: (5mmまで)





: (5mmまで)

3) モンモリロナイト含有割合

図 3.3.4-19及び図 3.3.4-20に定量結果を示す。どの試料も 90%以上のモンモリロナイト 含有量であり、大きな変化は見られなかった。入口側の方が、含有率が低い傾向は読み取れ る。この結果は、前項の乾燥密度の分布と整合するものであると考えられる。図 3.3.4-23に モンモリロナイト含有量と乾燥密度の関係を示した。相関は低いが、乾燥密度の増加に伴い、 含有率も高くなっている。このことは、密度が高いほど変質速度(溶解速度)が低いことと 整合している。

モンモリロナイトの含有量の減少は、本分析法の精度から見ると有意な結果であると考え られるが、他の分析でモンモリロナイト以外の鉱物が同定されることによって、含有量が減 少していることははじめて裏付けられるものである。

減量以外でも、TG 曲線、あるいは DTG 曲線に、試験前試料との差異が認められた。図 3.3.4・21及び図 3.3.4・22に比較を示す。試験後の試料の H₂O+の減量は、試験前のものを比べ て、高温まで続いていた。また、モンモリロナイトの含有率の定量に用いる H₂O⁻の減量は 低温側にシフトし、クニピア・P にははっきり見られた、高温側の 2 つ目の変位の小さなピー クは見られなかった。

モンモリロナイトの熱分析による測定は、含有量にその構造水の減量率が比例しているこ とと共に、Ca型ではH2O+の減量ピークの直後に別のピークが見られるなど、モンモリロナ イトの構造を反映したTG曲線が得られると考えられる。この熱分析の結果をモンモリロナ イトの構造に帰属した例は今のところ見られないが、この検討により、モンモリロナイトの 構造が議論できる可能性があると思われる。

モンモリロナイトの含有率の減少は、溶解によるものと溶解+二次鉱物の生成によるもの が考えられる。各試料ともモンモリロナイト含有率の変化は数%にとどまり、最大でも8% の変化である。また、変質あるいは溶解が進んでいないと言える。バラつきがある試料も認 められたが、本測定の測定誤差は2%程度であることを考慮すると、給水側で含有率が低い 傾向が認められた。



図 3.3.4-19 モンモリロナイト含有率(1)



図 3.3.4-20 モンモリロナイト含有率(2)



図 3.3.4-21 TG 曲線の比較



図 3.3.4-22 DTG 曲線の比較



図 3.3.4-23 乾燥密度とモンモリロナイト含有率の関係

- 4) AFM による溶解の測定
 - a. AFM 測定結果

図 3.3.4-24に AFM で測定した画像の一例を示す。ベントナイトが分散して薄い箔状に なっていることがわかる。粒子の大きさはさまざまであり、大きさの分布に幅があること が予想される。また、粒子の厚みが厚くなっているものが見られ、モンモリロナイト以外 のものが存在していることを示している。

モンモリロナイトの面積を画像処理によって求め、その平均面積と初期試料の平均面積 の差から溶解量を算出し、式 3.3.4-1 によって試験期間中の溶解速度を求めた。表 3.3.4-7 に溶解速度とその算出式のデータを示す。表中の試料重量(weight)、乾燥密度(Density) は(3) 2)項で測定した値を用いた。端面積(ESA)、底面積(BSA)の median 値は AFM の測定から得た。

$$rate = -\frac{\Delta V}{ESA \cdot MV \cdot t} \qquad (\vec{\mathfrak{R}} \ 3.3.4 \cdot 1)$$

 ΔV : Volume loss of single grain (m3) MV: molar volume* (10-6 m3/mol) \Rightarrow 138.36 ESA: total surface area (m2) \Rightarrow medeian t : time (s)

溶解速度は-10E-11~-10E-12 のオーダーであり、この速度はこれまで位相シフト干 渉計と AFM によって測定した速度のオーダーと一致した。液性による差は大きくなかっ た。No.2 は他の試験系と比べ速度が遅いように見える。これは、溶解が初期に起こって おり、その後の溶解が非常に遅いために、試験期間が長くなるほど速度が遅いように見え ているためと考えられる。また、圧縮により、粒子が破断された可能性もあり、AFM に
よる溶解速度の算出では、破断による粒子のアスペクト比の変化も溶解として扱われるため、影響が懸念される[7]。

AFM での観察で、No.9 (KPDS-HP1)の出口側の層である No.9-7 では、モンモリロ ナイトの変質が見られた (図 3.3.4-26参照)。この画像では厚さが 1nm 以上の粒子、あ るいは周辺部の厚みが増している粒子が見られる。これはモンモリロナイトの変質によっ て特徴的に見られるものであり、アナルサイムができている可能性もある。ただし、 AFM 以外の分析でアナルサイムは確認されていないため、確認にはさらに詳細な分析が 必要である。

Ca型クニピア・F については、図 3.3.4・25及び図 3.3.4・27に示すように Na型のように 分散せず、モンモリロナイト一層の粒子像ではなく厚みのある粒子の集合体の像であった ため、AFM による測定はできなかった。Ca型のモンモリロナイトの測定方法は別途検討 する必要がある。



※画像の一辺の寸法は5μm

図 3.3.4-24 AFM 測定画像(1): Na 型クニピア-F (No.5)



※画像の一辺の寸法は5μm

図 3.3.4-25 AFM 測定画像(2): Ca 型クニピア・F (No.4)



図 3.3.4-26 AFM 画像: (No.9-7)

No #		Duration (d)	Solution	woight (g)	Doncity	ESA median	BSA median	Volume	Volume loss	Molar diff.	Rate	SESA(m2/a)	ESA(m2)
NO.#	טו	Duration (u)	Solution	weight (g)	Density	(nm2)	(nm2)	(nm3)	(nm3)	(mol)	(mol/m2/s)	SESA (IIIZ/g)	ESA (IIIZ)
1	Kunipia-F	0				1163.80	161618.0	77172.6	84445.41			4.38	
2	Ca-Kunipia-F	0				蒸留水中	で分散しなた	いったため、	測定不可				
3	No2-05-01	1771.4	CaCl2	3.070	1.309	518.79	30803.7	14708.8	146909.2	-4.514E-19	-5.6857E-12	11.23	34.47
4	No2-05-05	1771.4	CaCl2	2.214	1.542	571.66	38671.9	18465.8	143152.2	-4.243E-19	-4.8495E-12	9.85	21.81
5	No2-05-09	1771.4	CaCl2	2.183	1.545	539.76	32997.1	15756.1	145861.9	-4.439E-19	-5.3732E-12	10.91	23.81
6	No.2-10-01	1771.4	CaCl2	4.294	1.518	488.24	28133.4	13433.7	148184.3	-4.607E-19	-6.1648E-12	11.57	49.68
7	No.2-10-05	1771.4	CaCl3	4.219	1.493	575.86	37002.6	17668.7	143949.3	-4.301E-19	-4.8795E-12	10.38	43.78
8	No.2-10-last	1771.4	CaCl3	3.564	0.945	555.10	37002.6	17668.7	143949.3	-4.301E-19	-5.0620E-12	10.00	35.65
9	No.3-1	1043.9	H2O	4.085	1.522	494.13	27942.7	13342.6	148275.4	-4.613E-19	-1.0351E-11	11.79	48.16
10	No.3-3	1043.9	H2O	2.204	1.557	568.52	33569.3	16029.4	145588.6	-4.419E-19	-8.6181E-12	11.29	24.88
11	No.3-7	1044.9	H2O	5.719	1.513	470.12	25177.0	12022.0	149596.0	-4.709E-19	-1.1094E-11	12.45	71.19
12	No.4-1	1043.9	H2O	3.161	1.511								
13	No.4-3	1043.9	H2O	2.320	1.629	蒸留水中	で分散しなた	いったため、	測定不可				
14	No.4-7	1044.9	H2O	7.524	1.659								
15	No.5-1	1043.9	NaCl	1.358	0.957	638.36	43945.3	20983.9	140634.1	-4.061E-19	-7.0533E-12	9.68	13.15
16	No.5-3	1043.9	NaCl	2.052	1.452	625.82	50976.6	24341.3	137276.7	-3.818E-19	-6.7647E-12	8.18	16.80
17	No.5-7	1043.9	NaCl	8.321	1.307	573.90	36914.1	17626.5	143991.5	-4.304E-19	-8.3144E-12	10.36	86.24
18	No.9-1	1041.8	NaOH	1.231	0.871	598.40	39100.6	18670.5	142947.5	-4.228E-19	-7.8497E-12	10.20	12.56
19	No.9-3	1041.8	NaOH	0.865	1.017	664.32	51855.5	24761.0	136857.0	-3.788E-19	-6.3347E-12	8.54	7.39
20	No.9-7	1041.8	NaOH	9.827	1.494	795.04	66796.9	31895.5	129722.5	-3.272E-19	-4.5726E-12	7.93	77.97
21	No.10-1	1041.8	NaCl	1.539	1.087	607.02	41308.6	19724.9	141893.1	-4.152E-19	-7.5988E-12	9.80	15.08
22	No.10-3	1041.8	NaCl	2.157	1.526	564.49	45703.1	21823.2	139794.8	-4.000E-19	-7.8728E-12	8.23	17.76
23	No.10-7	1041.8	NaCl	9.773	1.462	573.00	37793.0	18046.1	143571.9	-4.273E-19	-8.2852E-12	10.11	98.78

表 3.3.4-7 AFM 測定から得られた溶解速度



No.4-1

No.4-7 ※画像の一辺の寸法は5µm

図 3.3.4-27 No.4 の AFM 像の例

試料位置と溶解速度の関係を図 3.3.4-28に示す。通水側を 0mm として、切り分けた試 料の厚みの中心値を位置として示した。速度が通水入口側からの距離に依存していたのは、 No.9 (NaOH を通水した系)のみで、他の試験系では、位置に依存する傾向は見られなか った。これは、乾燥密度が通水入口側で低くなっていた傾向とは整合しない結果である。 今回得られた溶解速度は、2~3 倍の差しかなく、誤差を考慮すると、傾向として捉えら れていないことも考えられる。

図 3.3.4-35に乾燥密度と溶解速度の関係を示す。No.3(H2O 通水の試験系)の溶解速 度が他の試料に比べて早くなっている。溶解速度は密度が高いほど低くなるというこれま での知見、及び、No.3 の密度が高く保たれていることは溶解が起こっていないと考えら れる等とは整合しない。この原因として、前述のモンモリロナイトの破断等による影響が 速度に出ている、あるいは未飽和度が高いため溶解が早い、等の可能性がある。いずれに しろ、図 3.3.4-29からは溶解速度と乾燥密度との相関関係は見られない。

図 3.3.4-30~図 3.3.4-33に AFM により求めた粒径分布を示す。図 3.3.4-30は、試験 前の Kunipia-F の粒径分布である。これに比べ、図 3.3.4-31からの試験後試料の粒径分 布は粒径が小さい方にシフトしていることがわかる。また、No.3 は正規分布をしておら ず、粒径の小さい方に N 値が偏っており、破断による粒径の変化の可能性がある。No.5 は正規分布に近い分布を持っており、また、No.9 は通水面が変質していることを伺わせ る。モンモリロナイトの溶解挙動を評価するための粒径分布の評価では、圧密系において は破断状態の考慮が必要と考えられる。



図 3.3.4-28 試料位置と溶解速度(AFM)の関係



図 3.3.4-29 乾燥密度と溶解速度(AFM)の関係



図 3.3.4-30 AFM による Kunipia-F の粒径分布



図 3.3.4·31 AFM による粒径分布(1) (No.3_H₂O 通水)



図 3.3.4-32 AFM による粒径分布(2) (No.5_NaCl_0.3M 通水)



図 3.3.4-33 AFM による粒径分布(3) (No.9_NaOH 通水)

b. モンモリロナイト含有量の変化からの溶解速度の算出

(3) の3)で示したモンモリロナイト含有量とAFMで得られたモンモリロナイトの表面 積のデータから、溶解速度を算出した。また、算出式を式 3.3.4・2 示す。ここで用いた減 重量は、初期の密度が均一だと仮定し、試験後に切り出した厚さの割合から初期重量と試 験後重量の差を示している。モンモリロナイト含有率はバラつきの大きいものもあったた め、試料毎に平均値を用いた。重量あたりの端面積(SESA)は AFM 測定で得られた試 料毎の値を使用している。

用いたデータ及び得られた溶解速度を表 3.3.4-8に示す。表中で Loss wt.のカラムでハ ッチングされているのは、試験後重量の方が増しているものであり、誤差及び初期の密度 分布の影響によるものと考えられる。溶解速度は減重量がプラスであったものを対象に求 めている。ここで得られた溶解速度には、密度分布等による誤差が見込まれる。

$$rate = -\frac{\Delta n}{Mm \cdot SESA \cdot t}$$
 (式 3.3.4-2)

 $\Delta n : Molar difference (mol) = Loss wt. (g) /FW$ Mm : mont.mass(g) $SESA : specific edge surface area (m²/g) \leftarrow AFM$ t : time (s) $(W = D = M_{e}) / FW$

$$\Delta n = (V_{0i} \times D_0 - Mm) / FW$$
 (式 3.3.4-3)

$$Mm = Mm_i \times Cm_i \tag{\tilde{T} 3.3.4-4}}$$

V₀i : before mont. volume (cm³) (by rate)
D₀ : density (g/cm³)
FW: formula weight (g)
Cm : mont. Content (%)

表中に TG で求めた溶解速度と共に AFM で求めた速度を再掲した。2 つの速度のオ ーダーは一致していた。

試料位置と溶解速度の関係を図 3.3.4-34に示す。No.2 以外は通水液入口側で溶解速 度が速い傾向が見られた。No.2 は、密度分布があったためか入口と出口の 2 点しか速 度が得られなかったため、傾向について述べることはできないが、乾燥密度も出口側で 低くなっており、出口側で何らかの変化が起こっていることが予想される。

図 3.3.4-35に乾燥密度とモンモリロナイト含有率からもとめた溶解速度の関係を示 す。AFM で得た溶解速度では、乾燥密度との相関関係は見られなかったが、TG で得 た溶解速度は相関を持っており、乾燥密度が高いほど溶解速度は遅くなっていた。この 関係は、これまで得られている知見と整合する。

図 3.3.4-36には2つの溶解速度の比較のための図を示す。TGによって得た溶解速度

が AFM で得た速度よりも遅いことがわかる。赤四角で示した CaCl₂ を長期通水した No.2 の溶解速度は、どちらの方法でも小さかった。この原因は、前項でも述べた通り、 初期の溶解が早く、初期に圧縮による破断等により溶けやすい部分が溶けた後は、溶解 は非常遅いため、長期に試験を行うほど溶解速度が遅く見えることによると考えられ る。

今回行った AFM による溶解速度と TG によるものは、TG によって得られた速度の方 がこれまで得られた知見に整合するものであった。ただし、(3)の 3)で述べたように、 随伴鉱物や二次鉱物としてカルサイトが生成した場合には、その影響を分離することが できないため、ベントナイトの一般的な分析方法として用いるにはさらに検討が必要で ある。

	ID	Duration (d)	SESA (m2/g)	weight (g)	Density (g/cm3)	mont.%	mont.mass (g)	mont.(mol)	before mont volume (cm3)	before mont dry wt.(g)	Loss wt. (g)	Molar diff.(mol)	ESA(m2)	Rate by TG (mol/m2/s)	Rate by AFM (mol/m2/s)
1	Kunipia-F	0	4.38			100.0%									
2	No.3-1	1043.9	11.79	4.085	1.522	95.5%	3.899	-1.044E-02	2.745	3.863	-0.036	9.756E-05	4.597E+01		-1.035E-11
3	No2-05-01	1771.4	8.85	3.070	1.309	95.8%	2.940	-7.869E-03	2.360	3.296	0.357	-9.544E-04	2.602E+01	-2.397E-13	-3.507E-12
4	No2-05-05	1771.4	9.85	2.214	1.542	97.3%	2.153	-5.763E-03	1.444	2.018	-0.135	3.625E-04	2.122E+01		-4.850E-12
5	No2-05-09	1771.4	10.91	2.183	1.545	98.1%	2.142	-5.733E-03	1.421	1.986	-0.156	4.173E-04	2.336E+01		-5.373E-12
6	No.5-1	1043.9	9.68	1.358	0.957	96.2%	1.306	-3.496E-03	1.323	1.866	0.560	-1.500E-03	1.265E+01	-1.315E-12	-7.053E-12
7	No.5-3	1043.9	10.37	2.052	1.452	95.7%	1.963	-5.255E-03	1.317	1.859	-0.104	2.797E-04	2.035E+01		-1.085E-11
8	No.5-7	1043.9	10.36	8.321	1.307	97.5%	8.117	-2.173E-02	5.935	8.374	0.258	-6.894E-04	8.413E+01	-9.086E-14	-8.314E-12
9	No.9-1	1041.8	10.20	1.231	0.871	95.8%	1.179	-3.156E-03	1.300	2.077	0.898	-2.404E-03	1.203E+01	-2.221E-12	-7.850E-12
10	No.9-3	1041.8	8.54	0.865	1.017	91.8%	0.794	-2.126E-03	0.783	1.250	0.456	-1.222E-03	6.782E+00	-2.001E-12	-6.335E-12
11	No.10-1	1041.8	9.80	1.539	1.087	93.0%	1.432	-3.832E-03	1.356	2.169	0.737	-1.973E-03	1.403E+01	-1.563E-12	-7.599E-12
12	No.10-3	1041.8	8.23	2.157	1.526	94.1%	2.029	-5.431E-03	1.353	2.165	0.136	-3.631E-04	1.671E+01	-2.415E-13	-7.873E-12
13	No 10-7	1041.8	10 11	9 773	1 4 6 2	92.3%	9.017	-2 414F-02	6 3 9 9	10 238	1 2 2 1	-3 268F-03	9 114F+01	-3 983F-13	-8 285E-12

表 3.3.4-8 モンモリロナイト含有量から算出した溶解速度







図 3.3.4-35 乾燥密度と溶解速度(TG)の関係



図 3.3.4-36 AFM による溶解速度とTG による溶解速度の比較

5) XRD 分析

図 3.3.4-37~図 3.3.4-52に、各試料の不定方位 XRD 回折、EG 処理定方位 X 線回折を示 す。各図に試験前の Na 型クニピア・F (2008 クニピア F) と Ca 型クニピア・F (Ca 型クニピ ア)の X 線回折を同時に示した。また、不定方位の X 線回折には、随伴鉱物の石英と二次鉱 物として生成する可能性が高いアナルサイムのピーク位置を示した。

どの結果を見ても、モンモリロナイトの構造が保たれていることがわかる。大きな変質、 二次鉱物の生成はないと判断できる。試験に用いたクニピア・Fに含まれていた石英も試験後 の試料でも確認できた。アナルサイムの生成は認められない。XRD分析によって、確認でき るのはパーセントオーダーでの生成である。石英については、結晶性が高いため、少量でも ピークが1%以下でもピークが確認できた可能性はあるが、クニピア・Fには無視できない石 英が含まれていることが確認できた。また、全く二次時鉱物が生成していないとは言い切れ ないが、今回の分析で確認できる量及び結晶度のアナルサイムの生成はないと言える。



図 3.3.4-37 No.2 KPCaの不定方位 X線回折(1)



図 3.3.4-38 No.2 KPCaの不定方位 X線回折(2)



図 3.3.4-39 No.2 KPCaの不定方位 X線回折(低角側)



図 3.3.4-40 No.2 KPCaのEG処理不定方位X線回折(1)



図 3.3.4-41 No.2 KPCaのEG処理不定方位X線回折(2)



図 3.3.4-42 No.3 KPCa-H の不定方位 X 線回折



図 3.3.4-43 No.3 KPCa-HのEG処理不定方位X線回折



図 3.3.4-44 No.4 CKPCa-Hの不定方位 X 線回折



図 3.3.4-45 No.4 CKPCa-HのEG処理不定方位X線回折







図 3.3.4-47 No.5 KPCa-NのEG処理不定方位X線回折



図 3.3.4-48 No.9 KPDS-HP1の不定方位 X 線回折



図 3.3.4-49 No.9 KPDS-HP1の不定方位 X線回折(低角側)



図 3.3.4-50 No.9 KPDS-HP1のEG処理不定方位X線回折



図 3.3.4-51 No.10 KPDS-HP2の不定方位 X 線回折



図 3.3.4-52 KPDS-HP2のEG処理不定方位X線回折

- 6) µ-XRD 分析
 - a. No.3 KPCa-Hの µ-XRD 分析結果

No.3 はクニピア・F に蒸留水を通水した系である。図 3.3.4-53に X 線回折を示す。 石英のピークが見られるが、他のピークはモンモリロナイトのピークである。回折線の 強度比の変化があることから、積層状態が変化していることが読み取れる。特に出口側で 005 のピークが非常に強くなっている。図中にアナルサイムのピーク位置を示しているが、 ピークは見られず、μ-XRD による測定からは変質等はほとんどないことが分かった。



図 3.3.4-53 No.3 の µ - XRD による X 線回折

b. No.4 CKPCa-Hの µ-XRD 分析結果

No.4 は Ca 型クニピア・F を使用し、通水液は蒸留水の試験である。結果を図 3.3.4-54 に示す。ピークは Ca 型モンモリロナイトのパターンに一致した。通水側に石英のピーク がわずかに見られるが他に鉱物は見られなかった。



図 3.3.4-54 No.4 の µ - XRD による X 線回折

c. No.5 KPCa-Nの µ-XRD 分析結果

No.5 はクニピア・F に 0.3M の NaCl を通水した試験である。前述の No.3 ので見られた ように、モンモリロナイトの積層状態が変化したため、ピーク位置は変わらないが、ピー ク強度比が変化している。測定スポットの画像と得られたX線回折パターンの例を図 3.3.4-55に示す。No.3 と同様に石英のピークが見られたが、他の鉱物のピークは認められ なかった。



図 3.3.4-55 測定した試料の CCD 画像とデバイシェラーリング



図 3.3.4-56 No.5 位置による回折データの比較



図 3.3.4-57 No.5-1 µ-XRD 定性分析結果

d. No.9 KPDS-HP1の µ-XRD 分析結果

No.9 は NaOH を通水した試験である。そのため、モンモリロナイトの溶解、変質が見られる可能性がある。これまでの結果及び化学解析の結果から予想される二次鉱物はアナルサイムであるため、アナルサイムに特に着目してデータの解析を行った。

図 3.3.4-58に層ごとの回折線を示す。得られたピークはモンモリロナイトにほとんど帰属された。石英のピークがわずかに見られたが、アナルサイムのピークは見られなかった。 石英はクニピア-F にもともと含まれていたものだと考えられる。

測った場所によって、ピーク強度比が異なっており、モンモリロナイトの積層状態が違うことが図から読み取れる。通水側では試験前のモンモリロナイトよりも005のピークが強いのに対し、出口側では300のピークが強く、また、高角度側のピーク(221, 310)も出口側の方が強く、積層が進んでいることが示唆された。



図 3.3.4-58 No.9 の µ - XRD による X 線回折

e. No.10 KPDS-HP2の µ-XRD 分析結果

No.10 は 0.1M の NaCl を通水した系である。No.5 よりもイオン強度が低く、圧密状態 は No.5 より高い。

結果はほぼ、No.5 と同等であり、大きな変質は見られなかった。通水側で高次のピー クが高くなっているのが見られ、積層状態が変化していることが推察される。

f. No.2 KPCaの µ-XRD 分析結果

No.2 は、クニピア-FのNa型からCa型への変化による力学的な挙動を得るための長期 試験であった。そのため、通水側のモンモリロナイトはCa型になっていると考えられる。

通水側のμ-XRDでの測定結果を図 3.3.4-59、図 3.3.4-60及び図 3.3.4-61に示す。回折 パターンは Ca 型モンモリロナイトに近いものとなっている。Ca 型化していることが示唆 される。しかし、今回の測定では定量的に示すことができないため、SEM-EDS の結果と



図 3.3.4-59 No.2-05-1の CCD 画像とデバイシェラーリング



図 3.3.4-60 No.2 通水側の回折パターン



図 3.3.4-61 No.2-05-9(通水側から 4.6mm)のµ-XRD 定性分析結果

図 3.3.4-62に No.2 の出口側の X 線回折パターンを示す。これらの試料は厚みがあっため、通常、X 線が透過する試料端でもきれいなパターンが得られないケースがあったが、 概ね Na 型モンモリロナイトの回折線であると判断できるものであった。



図 3.3.4-62 No.2 出口側の回折パターン

7) 分析結果 FESEM 観察及び EDS 分析

a. No.2 の FE-SEM 観察結果

結果の例として No,2-05-01 のモンモリロナイト部と判断される箇所の分析結果を図 3.3.4-63に示す。SEM 画像によって、モンモリロナイトと判断される場所、それ以外の随 伴鉱物あるいは二次鉱物と推定されるものをそれぞれ、Area、あるいは Point で指定して、 EDS による元素分析を行った。

測定した結果のうち、モンモリロナイトと判断された箇所は全酸素数を 22.0 としてカ チオン数を算出した。表 3.3.4-9に No.2のカチオン数を示す。モンモリロナイトの場合 Si のカチオン数は8以下である。通水面から一層目である No.2-05-01は、画像では明らかに モンモリロナイトの形状を持っているにも関わらず、Si が 9.01 であった。これは、この 倍率の画像では判別できなかったが、モンモリロナイトと他の鉱物が混在している可能性 を示唆する。Ca のカチオン数も高いことから考えると、CSH の可能性が高い。

モンモリロナイトの Ca 型化の挙動を見るために、Ca と Na の比を試料位置との関係で 示したものを図 3.3.4-64に示す。a は表 3.3.4-9に示した全試料を試料毎に平均した値を プロットしたものであり、b は上述の理由で Si が 8 を超えるものを除いて平均したもので ある。モンモリロナイトの層間イオンを評価するためには b の分布が適切であると思われ る。図中、赤線で示したのはクニピア-F の Ca と Na の比であり、後述の No.3 (クニピア -F に蒸留水を通水した試験)から得られた値を示している。図より、No.2 の試験では CaCl2を通水したことにより、通水面から約 10mm まで徐々に Ca 型化が進行しているこ とが示唆される。局所的にみるとカチオン数は比は均一ではないため、各測定点の値をプ ロットしたものを図 3.3.4・67に示す。バラ付きは大きいが、平均値で見られたように、 Ca型化が起こっていることがわかる。しかし、長期にわたる試験によっても Ca型化はセ ル全域には及んでおらず、イオン交換の速度は非常に遅いことがわかった。

モンモリロナイト以外の鉱物について、観察したものを図 3.3.4-66に示す。基板上に分 散した試料に見られるほとんどの粒子は図中の b で示した石英(SiO₂)であった。a は組 成からフィリップサイトあるいはチャバザイト等のゼオライトである可能性が高い。もと もとクニピア・F に入っていた可能性もあるが、二次鉱物として生成したことも考えられる。 しかし、このような粒子は非常に少なく、他の分析では得られていないことからも生成し たとしてもわずかである。



タイトル	: IMG1
装置	: 6700F
加速電圧	: 15.00 kV
倍率	: x 1.500
測定日時	: 2015/01/09
画素数	: 1024 x 768

	360 073	
	320	
	280 -	
Ints	200	
Cou		
	0.00 1.00 2.00 3.00 4.00 5.00 6.00 7.00 8.00 9.00 10	.00
	keV	

ZAF法 簡易定量分析(酸化物) フィッティング係数 : 0.5944 全酸素数 : 22.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
0		49.11						
Na K								
Mg K	1.253	0.21	0.95	0.56	MgO	0.35	0.06	0.3314
AĬK	1.486	6.83	1.00	8.12	AT203	12.91	1.81	12. 4253
Si K	1.739	35.33	1.21	80.69	Si02	75.57	9.01	68, 9613
КК	3.312	0.63	1, 12	0.52	K20	0.76	0.12	1.4159
Ca K	3, 690	2.30	1.50	3.68	Ca0	3.22	0.41	5, 4998
Mn K	5.894	0.53	3.39	0.62	Mn0	0.69	0.07	1.0661
Fe K	6.398	5.06	3, 65	5.81	Fe0	6.50	0.65	10.3002
合計		100.00		100.00		100.00	12.14	

図 3.3.4-63 No.2-05-01 SEM-EDS による元素分析結果 :モンモリロナイト部分

Sample	Na	Mg	Al	Si	К	Ca	Fe
	0.00	0.06	1.81	9.01	0.12	0.41	0.65
	0.37	0.57	2.43	8.29	0.00	0.43	0.55
	0.78	0.87	3.34	7.69	0.03	0.13	0.21
2-05-01	0.84	0.54	2.97	8.18	0.00	0.05	0.17
2-05-01	0.55	0.77	3.44	7.71	0.05	0.15	0.21
	1.30	0.68	3.30	7.73	0.00	0.21	0.06
	0.79	0.71	3.07	7.98	0.02	0.16	0.11
	0.68	0.64	2.96	8.04	0.00	0.14	0.27
	1.44	0.42	3.09	8.50	0.97	0.55	0.16
	1.09	0.87	3.04	7.74	0.00	0.31	0.23
2-05-05	1.19	0.98	3.13	7.55	0.05	0.32	0.20
	0.93	0.78	3.10	7.86	0.03	0.10	0.26
	0.89	0.83	3.04	7.91		0.11	0.23
	1.03	0.83	3.30	7.68	0.02	0.05	0.29
2-05-00	0.72	0.79	3.14	7.91	0.04	0.12	0.19
2 03 09	0.93	0.58	3.23	7.93		0.07	0.19
	0.59	0.65	3.25	7.86	0.01	0.21	0.24
「	0.84	0.76	3.12	7.96		0.11	0.11
2-10-01	0.79	0.91	3.02	7.94	0.01	0.15	0.13
	0.93	0.75	3.56	7.54		0.17	0.23
	0.81	0.74	3.54	7.74			0.06
2-10-05	0.83	0.93	3.40	7.61	0.07	0.03	0.28
2 10 03	0.78	0.59	3.20	7.98	0.04	0.07	0.16
	0.89	0.84	3.55	7.59		0.14	0.06
2-1-0-+	1.09	0.52	3.08	8.09			0.13
∠-Last	0.95	0.73	3.13	7.98	0.16	0.01	0.05
	0.66	0.88	2.99	7.97		0.11	0.25

表 3.3.4-9 No.2 の EDS 分析によるカチオン数







図 3.3.4-65 No.2 KPCa の Ca/(Ca+Na)比



図 3.3.4-66 No.2 モンモリロナイト以外の鉱物

b. No.3,4 及び 5 の FE-SEM 観察結果

表 3.3.4・10に EDS 分析により算出したカチオン数を試料毎に示す。No.3 と No.5 は Na 型クニピア・F を出発物質として使っているが、No.4 は Ca 型クニピア・F を使っている。 No.3 と No.4 は蒸留水を通水した試験であり、No.5 はイオン強度 0.3mol/L の NaCl を通 水した試験である。それぞれ、通水液と用いたクニピアのイオン型を考えるとイオン交換 はしないと考えられるが、(3)の 1)の液相分析の結果では排水に各元素の溶けだしがあり、 余剰のイオン等が洗い出されている可能性がある。 それぞれの試料の Ca/(Ca+Na)比を図に示す。a には全点をプロットし、b には平均値を プロットした。No.4 は Ca 型モンモリロナイトが主成分であるため、Ca/(Ca+Na)比は高 くなっている。同じ Na 型でも No.5 の方が Ca/(Ca+Na)比は高く、残存していた層間の Ca が交換されているから、通水液中の Na がモンモリロナイト中に過剰に取り込まれたこ とが推測される。

図 3.3.4-68に示すように、モンモリロナイトの上に見られる粒子は Si に富んだ組成で あり、クニピア・Fに含まれる不純物である石英であると考えられる。観察した範囲では、 石英以外の二次鉱物と思われるものは見られなかった。No.3,4,5 の液性では二次鉱物はで きにくいと考えられる。

Sample	Na	Mg	Al	Si	К	Ca	Fe
	1.04	0.84	3.46	7.61		0.06	0.17
	1.12	0.54	3.22	7.90		0.09	0.17
3-1	1.16	0.75	3.31	7.78		0.05	0.08
	1.11	0.53	2.85	8.14			0.36
	1.31	0.53	3.28	7.93	0.01	0.00	0.05
	1.22	0.65	3.19	7.86	0.03	0.06	0.15
3-3	1.12	0.76	3.11	7.82	0.09	0.09	0.25
	1.28	0.74	3.03	8.00	0.08		
	1.23	1.01	2.98	7.82	0.05	0.06	0.18
3-7	0.87	0.97	3.30	7.73			0.18
	0.73	0.84	3.50	7.64	0.04	0.05	0.20
	0.15	0.79	3.25	7.85	0.05	0.35	0.18
		0.92	3.22	7.80		0.50	0.18
1-1	0.03	0.81	3.15	7.89	0.08	0.29	0.32
	0.10	0.77	3.45	7.69	0.05	0.38	0.23
	0.10	0.77	3.45	7.69	0.05	0.38	0.23
	0.02	0.67	3.15	7.96	0.00	0.41	0.25
		0.68	3.15	8.01		0.30	0.29
4-3	0.05	0.84	3.32	7.87	0.03	0.30	0.09
	0.05	1.00	3.21	7.71		0.41	0.32
	0.10	0.61	3.40	7.80		0.46	0.19
		0.78	3.21	7.92	0.01	0.40	0.10
4-7	0.69	0.92	2.74	7.87	0.07	0.66	0.20
	0.28	0.86	3.09	7.82	0.01	0.55	0.17
	0.22	0.69	3.03	7.98	0.05	0.46	0.21
	1.44	0.62	3.28	7.77	0.05	0.04	0.14
5-1	0.88	0.87	3.36	7.69	0.11	0.07	0.14
	1.12	0.63	2.99	7.86	0.00	0.39	0.20
5-3	1.68	0.81	2.92	7.61	0.15	0.29	0.38
J_J	0.78	0.99	2.89	8.00	0.04	0.15	0.12
5_7	1.06	1.14	3.45	7.49	0.00	0.18	0.01
5-7	0.61	0.46	2.19	9.76	0.00	0.22	0.21

表 3.3.4-10 No.3,4,5の EDS 分析によるカチオン数



図 3.3.4-67 No.3,4,5 の Ca/(Ca+Na)比 a:全点、b:平均値



タイトル	:	IMG1
装置 加速電圧 倍率 測定日時 画素数		6700F 15.00 kV x 8,500 2014/12/12 1024 x 768

	100 - 008	测点发展
	860	測定条件 装置名 : 6700F 加速電圧 : 15.0 kV
	320	加速電圧 10.0 KV 照射電流 2.56160 nA PHAモード :T3
	280 - 2	経過時間 : 149.47 sec 有効時間 : 143.54 sec
s	240	デッドタイム : 3 % 計数率 : 832 cps
ount		エネルギ範囲 : 0 - 20 keV
0		
	40	
	0.00 1.00 2.00 3.00 4.00 5.00 6.00 7.00 8.00 9.00 10.00	
	keV	
ZAF法 フィッ	商易定量分析(酸化物) ティング係数 : 0. 4640	

フィッティ	ング係数 :	0.4640							
全酸素数 :	24.0								
元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K	
0		51.32							
Na K	1.041	1.50	0.89	1.99	Na20	2.03	0.49	2, 7331	
Mg K	1.253	1.73	0.83	4.33	MgO	2.87	0.53	2.8922	
AĪK	1.486	3.48	0.90	3.92	AĪ203	6.57	0.96	6.5548	
Si K	1.739	40.36	1.06	87.52	Si02	86.34	10.75	84.0742	
КК									
Ca K	3.690	1.09	1.37	1.66	Ca0	1.53	0.20	2.6585	
Fe K	6, 398	0.52	3.34	0.57	Fe0	0.67	0.07	1.0871	
合計		100.00		100.00		100.00	13.01		

図 3.3.4-68 No.5-1 SEM-EDS による元素分析結果 : 粒子部分

c. No.9 及び 10 の FE-SEM 観察結果

No.9 及び No.10 は Na 型クニピア・F であり、通水液は No.9 が pH13 程度の NaOH、 No.10 は 0.1mol/L 程度の NaCl である。EDS での分析結果を表 3.3.4-11に示す。

モンモリロナイトは Na 型の組成を示したが、No.9 の方が Na のカチオン数が多い。他 の成分に大きな差がないため、この Na はモンモリロナイトを構成するものではない可能 性がある。

粒子は他の試料と同じようにほとんどが石英であった。その中で図 3.3.4-69に示した粒 子は他の粒子より細長い形状をしており、Na が多いとともに、Mg、K も含まれていた。 組成からアルカリ長石であると考えられる。No.9 の試験が最も二次鉱物の生成の可能性 が高いと予想されたが、アナルサイムは見つからなかった。圧縮した場合にはモンモリロ ナイトの変質は非常に遅く、二次鉱物の生成も少ないことが今回の試験により明らかとな った。また、今回の SEM 観察で、クニピア-F には石英が多く含まれていることがわかっ た。

Sample	Na	Mg	Al	Si	К	Ca	Fe
	1.48	1.00	3.13	7.53	0.00	0.28	0.21
0_1	1.21	0.79	3.25	7.74	0.00	0.09	0.17
9-1	1.29	0.70	3.46	7.64	0.05	0.03	0.14
	1.49	1.04	3.35	7.25	0.00	0.20	0.45
9-3	1.34	0.71	3.26	7.57	0.00	0.20	0.39
9-7	1.94	0.82	2.72	7.95	0.00	0.23	0.00
	0.99	1.02	2.91	7.55	0.16	0.35	0.26
10-1	0.55	1.53	2.89	7.78	0.10	0.15	0.10
	0.79	0.95	3.13	7.65	0.00	0.29	0.23
	1.44	0.64	3.19	7.85	0.00	0.00	0.16
	1.01	0.70	3.48	7.67	0.00	0.12	0.06
10-3	0.91	0.52	3.23	7.91	0.09	0.11	0.10
	1.07	0.90	3.39	7.72	0.07	0.00	0.00
	0.58	1.09	2.98	7.75	0.08	0.30	0.31
10_7	0.84	0.80	3.38	7.70	0.06	0.11	0.16
	1.18	0.63	3.19	7.76	0.06	0.22	0.21
	1.03	0.74	3.20	7.90	0.04	0.00	0.13

表 3.3.4-11 No.9,10の EDS 分析によるカチオン数



図 3.3.4-69 No.9-3 SEM-EDSによる元素分析結果 : 石英以外の鉱物

(4) 力学挙動試験の化学的変質に関する分析のまとめ

平成 26 年度に行った力学試験後試料の分析により、高圧縮下(1.5~1.6Mg/m³程度)での長 期間のクニピア・F の化学変質に関する貴重なデータが得られた。平成 26 年度分析対象とした のは、「Na 型ベントナイトの Ca 型化に伴う力学挙動変化の取得試験」と「Na 型ベントナイ トの溶解に伴う力学挙動変化の取得試験」の一部である。Ca 型化には CaCl₂溶液を用い、通水
させることにより Ca 型化を図った。それ以外の試験はその試験の挙動を確認するためのイオン強度の影響、イオン種の影響、Ca 型クニピア・F の挙動などを検討するための試験であった。

目的とした Ca型化は、SEM-EDS の結果とµ-XRD の結果より、通水側から起こっているこ とが確認できた。しかし、このイオン交換は表面から中ほどまでの層に限られており、厚さの 半分以下の部分では、Ca型の進行はごくわずかであった。溶解が全域で起こっているのに対 し、イオン交換は全域には及んでおらず、それぞれ別のメカニズムで起こっている可能性があ る。また、これまでイオン交換は非常に早いとされていたが、圧縮下ではイオン交換が抑制さ れていることも考えられる。このことは力学試験において、その挙動の変化が非常に遅いこと を裏付けるものと考えられる。

モンモリロナイトの溶解については、その溶解量はわずかであったが、これまで干渉計で測 定して来た圧縮状態でのクニピア・Pの溶解速度のオーダーと一致した。また、今年度新たに試 みたTG-DTAによるモンモリロナイトの含有率から得られた溶解速度もオーダーは同じであっ た。圧縮下でのモンモリロナイトの溶解速度が非常に遅いことを実証した結果となった。

また、二次鉱物の生成については、モンモリロナイトの含有率が減少していることから、生 成が示唆されたが、その量はどの試験においても5%以下であり、ほとんどの分析で生成を確 認するには至らなかった。もともとクニピア・F にはクニピア・P に比べて石英の含有量が多い ことが今回の分析でも明らかとなり、μ-XRD、SEM-EDS で得られたモンモリロナイト以外 の鉱物はほとんどが石英であった。No.9 の試験は NaOH を通水しているため、溶解、二次鉱 物の生成共に他の試験よりも多いことが予想されたが、溶解速度、モンモリロナイト含有量共 に他の試験と大きな差はなかった。しかし、少ないながらも、出口側の試料では SEM-EDS で は二次鉱物が定性的に多いことが観察され、また、AFM の測定時にも、変質したモンモリロ ナイトの像が得られている。今回、アナルサイムが生成していることの確証的なデータは得ら れなかったが、AFM の画像では変質時に認められるモンモリロナイトの厚さが 1nm 以上のも の及び周囲で厚みの増加しているものを観察したことから、変質が示唆された。

以上の結果より、今回行った分析により、圧縮下でのモンモリロナイトの Ca 型化、溶解は 非常に遅く、これまで干渉計等でミクロに求められてきた溶解速度等が、マクロの試験におい ても適用されることが明らかとなった。これは、圧縮により間隙率が小さくなり、間隙水が平 衡に近い状態となっていること、二次鉱物の生成が圧縮により抑制されていること、等による ものと考えられる。

3 - 145

3.3.5 化学変質を伴う力学挙動試験に関する地化学解析

3.3.4 で化学分析を行った化学変質を伴う力学挙動試験後の試料を対象に地化学分析を行った。 この地化学解析の結果と試験分析結果を比較し、化学解析への力学的な条件や挙動の考慮の必要 性、力学挙動モデルへの考慮すべき事項等の HMC 連成解析への反映事項を検討した。

- (1) 対象とする力学試験
 - 本年度化学分析を行う力学試験のケースを表 3.3.5-1、表 3.3.5-2に示す。これらの試験ケースを対象として、地化学解析を行う。

また、力学挙動試験を模擬した概念図を図 3.3.5-1に示す。

表 3.3.5-1 Na型ベントナイトの Ca型化に伴う力学挙動変化の取得試験ケース

呼称	モンモリロナイト	間隙水	備考	期間
KPCa	クニピア F 乾燥密度 1.4 Mg/m ³ 程度 ⇒1.5 Mg/m ³ 程度	蒸留水 ⇒ CaCl₂水溶液 イオン強度 0.3mol/l 程度	 ※継続試験 乾燥密度 1.5Mg/m³ で液種 を CaCl₂水溶液に置換中 供試体高さ 20mm 	2009~
КРСа-Н	クニピア F 乾燥密度 1.4 Mg/m ³ 程度 ⇒1.5 Mg/m ³ 程度	蒸留水	 ※継続試験 供試体高さ 5mm クリープ挙動の把握 	$2011 \sim$
CKPCa-H	Ca 型化クニピア F 乾燥密度 1.4 Mg/m ³ 程度 ⇒1.5 Mg/m ³ 程度	蒸留水	 ※継続試験 供試体高さ 5mm クリープ挙動の把握 	2011~
KPCa-N	クニピア F 乾燥密度 1.4 Mg/m ³ 程度 ⇒ 1.5 Mg/m ³ 程度	蒸留水 ⇒NaCl 水溶液 イオン強度 0.3mol/l 程度	 ※継続試験 供試体高さ 5mm イオン強度の影響把握 	$2011\sim$

表 3.3.5-2 Na型ベントナイトの溶解に伴う力学挙動変化の取得試験ケース

呼称	モンモリロナイト	間隙水	備考	期間
KPDS-HP1	クニピア F	NaOH 水溶液	₩ 総 続 試 験	
	乾燥密度 1.6Mg/m ³ 程度	pH13 程度	供試体高さ 5mm	$2011 \sim$
		超高圧、高通水圧		
KPDS-HP2	クニピア F	NaCl 水溶液	₩ 総試験	
	乾燥密度 1.6Mg/m ³ 程度	0.1mol/l 程度	供試体高さ 5mm	$2011 \sim$
		超高圧、高通水圧		



図 3.3.5-1 力学試験を模擬した体系概要図

(2) 解析条件

ここで、解析体系を図 3.3.5-2のように設定した。解析メッシュは、ベントナイト試料部分 5mm を 10 分割した。また、物質移行については、拡散場とした。力学試験は、通水試験を行っているが、浸出液は非常に少なく、また、ベントナイトの拡散係数は比較的大きい為、拡散 での移行のほうが早いと考えられるためである。

計算条件を表 3.3.5-3にまとめ、試料厚さ 5mm の場合における解析体系図を図 3.3.5-2に示 す。なお、解析プログラムは PHREEQC [8]を使用し、鉱物の熱力学データは JNC-TDB.TRU [9]を使用した。

	計算条件	
固相 (ベントナイト)	クニピア F	初期固相はモンモリロナイトのみ。 モンモリロナイトは溶解速度で溶解す る(第2次TRUレポート)。
試料直径	ϕ 60 mm	
試料厚さ	20 mm 5 mm	試験ケースに対応
初期乾燥密度	1.6 Mg/m ³ 1.5 Mg/m ³	試験ケースに対応
液相	蒸留水 CaCl₂水溶液 NaCl 水溶液 NaOH 水溶液	試験ケースに対応
拡散係数	1.2E-10 m2/s	拡散のみ(移流での移行は考慮しない)

表 3.3.5-3 計算条件



図 3.3.5-2 解析体系図

ここで、モンモリロナイトの溶解速度は、第2次TRUレポート[10]で使用された、次の式に 従う。モンモリロナイトの比表面積は7[m²/g]とした[10]。

(3) 計算結果

1) KPCa (Na型ベントナイトのCa型化に伴う力学挙動変化の取得試験)

クニピア F において、CaCl2水溶液(イオン強度 0.3mol/l 程度)の通水による Ca 型化に おける挙動変化試験を模擬したケースである。対象試料厚さは 20mm である。

図 3.3.5-3は、経過時間ごとの、液相組成および固相体積分布結果である。モンモリロナイトはほとんど溶解していないが、上流側から Ca 型化が進んでいることが分かる。初期に生成した二次鉱物は、時間を追うごとに溶解した。図 3.3.5-4は、上流端および下流端の、固相濃度の経時変化を示した。モンモリロナイトはほとんど溶解せず、また、下流端でも数百日間で Ca 型化した。

図 3.3.5-5は、1,000 日後の乾燥密度分布を試験分析結果とともに示した。上流端と下流端 を除くと、計算結果は試験結果と非常に近い。化学解析ではモンモリロナイトがほとんど溶 解せず、乾燥密度もほとんど変化していない。試験結果では、上流端及び下流端は他の部分 より密度が低下していた。この化学解析の試験との差異について、原因を検討していく必要 がある。



図 3.3.5-3 液相·固相分布結果図 (KPCa)







下流端

図 3.3.5-4 上流端および下流端の固相濃度経時変化(KPCa)



図 3.3.5-5 1000 日後の乾燥密度分布 (KPCa)

2) KPCa·H (Na型ベントナイトのCa型化に伴う力学挙動変化の取得試験)

クニピア F において、蒸留水(純水)を通水したことによる挙動変化試験を模擬したケースである。対象試料厚さは 5mm である。

図 3.3.5-6は、経過時間ごとの、液相組成および固相体積分布結果である。モンモリロナイトはほとんど溶解せず、また、Ca型化も変化しない。図 3.3.5-7は、上流端および下流端の、固相濃度の経時変化を示した。モンモリロナイトはほとんど溶解せず、全体的にほとんど変化がない結果となった。

図 3.3.5-8は、1,000 日後の乾燥密度分布を試験分析結果とともに示した。化学解析ではモンモリロナイトがほとんど溶解せず、乾燥密度もほとんど変化していなく、試験結果と概ね同じ傾向がある。



図 3.3.5-6 液相・固相分布結果図 (KPCa-H)









図 3.3.5-7 上流端および下流端の固相濃度経時変化(KPCa-H)



図 3.3.5-8 1,000 日後の乾燥密度分布 (KPCa-H)

3) CKPCa-H (Na型ベントナイトのCa型化に伴う力学挙動変化の取得試験)

先に Ca 型化処理を行ったクニピア F において、蒸留水(純水)を通水したことによる挙動変化試験を模擬したケースである。対象試料厚さは 5mm である。

図 3.3.5-9は、経過時間ごとの、液相組成および固相体積分布結果である。モンモリロナイトはほとんど溶解せず、また、Ca型化も変化しない。図 3.3.5-10は、上流端および下流端の、固相濃度の経時変化を示した。モンモリロナイトはほとんど溶解せず、全体的にほとんど変化がない結果となった。

図 3.3.5-11は、1,000 日後の乾燥密度分布を試験分析結果とともに示した。モンモリロナ イトがほとんど溶解せず、乾燥密度もほとんど変化していない。CKPCa-H は、2)の KPCa-H と同様に、純水を通水したケースであるため、ベントナイトの化学変質は少ないと考えられ る。試験により得られた密度分布の原因については検討し、必要な事項は解析に反映する必 要がある。



図 3.3.5-9 液相・固相分布結果図 (CKPCa-H)







下流端

図 3.3.5-10 上流端および下流端の固相濃度経時変化(CKPCa-H)



図 3.3.5-11 1,000 日後の乾燥密度分布 (CKPCa-H)

4) KPCa-N (Na 型ベントナイトの Ca 型化に伴う力学挙動変化の取得試験)

クニピア F において、NaCl 水溶液(イオン強度 0.3mol/l 程度)を通水したことによる挙 動変化試験を模擬したケースである。対象試料厚さは 5mm である。

図 3.3.5-12は、経過時間ごとの、液相組成および固相体積分布結果である。モンモリロナイトはほとんど溶解していない。Ca型化率は、NaClの浸入によって徐々に減少した。初期に生成した二次鉱物は、時間を追うごとに溶解した。図 3.3.5-13は、上流端および下流端の、固相濃度の経時変化を示した。モンモリロナイトはほとんど溶解せず、Ca型化率は数百日間で減少する結果となった。

図 3.3.5-14は、1,000 日後の乾燥密度分布を試験分析結果とともに示した。モンモリロナ イトがほとんど溶解せず、乾燥密度もほとんど変化していない。一方、試験結果は、上流端・ 下流端に向かって乾燥密度が減少する傾向となった。これは、純粋を通水したケース (KPCa-H)と比較すると、NaCl 通水による影響も含まれると考えられる。化学解析で再現

すべき挙動か、力学解析を試験データ取得等により原因を検討し、解析への反映事項を明確 にする必要がある。



図 3.3.5-12 液相・固相分布結果図 (KPCa-N)







下流端

図 3.3.5-13 上流端および下流端の固相濃度経時変化(KPCa-N)



図 3.3.5-14 1,000 日後の乾燥密度分布 (KPCa-N)

5) KPDS-HP1(Na型ベントナイトの溶解に伴う力学挙動変化の取得試験)

クニピア F において、NaOH 水溶液(pH13 程度)を通水したことによる挙動変化試験を 模擬したケースである。対象試料厚さは 5mm である。

図 3.3.5-15は、経過時間ごとの、液相組成および固相体積分布結果である。モンモリロナイトの溶解は非常に緩やかであり、1,000 日後に、通水側(上流端)で2割程度減少した。 Ca型化率は、NaOHの浸入によって通水側からすみやかに減少した。図 3.3.5-16は、上流端および下流端の、固相濃度の経時変化を示した。モンモリロナイトは、1,000 日後に、上流端で2割程度・下流端で数%減少した。Ca型化率は数十日で減少した。

図 3.3.5-17は、1,000 日後の乾燥密度分布を試験分析結果とともに示した。解析結果はモ ンモリロナイトが通水側で2割程度減少したことに伴い、乾燥密度がモンモリロナイトと同 様に通水側で低下し、試験結果の乾燥密度の傾向を概ね一致している。しかし、試験ではモ ンモリロナイトの溶解が顕著でない結果であり、解析では圧密系でのモンモリロナイトの溶 解速度は考慮していないため、溶解量は多くなったと考えられることから、NaOH 溶液通水 における密度低下の原因を検証していく必要がある。



図 3.3.5-15 液相・固相分布結果図 (KPDS-HP1)







下流端

図 3.3.5-16 上流端および下流端の固相濃度経時変化(KPDS-HP1)



図 3.3.5-17 1,000 日後の乾燥密度分布 (KPDS-HP1)

6) KPDS-HP2(Na型ベントナイトの溶解に伴う力学挙動変化の取得試験)

クニピア F において、NaCl 水溶液(0.1mol/l 程度)を通水したことによる挙動変化試験 を模擬したケースである。対象試料厚さは 5mm である。

図 3.3.5-18は、経過時間ごとの、液相組成および固相体積分布結果である。モンモリロナイトはほとんど溶解していない。Ca型化率は、NaClの浸入により、通水側から徐々に減少した。初期に生成した二次鉱物のブルーサイトは、時間を追うごとに溶解した。図 3.3.5-19は、上流端および下流端の、固相濃度の経時変化を示した。モンモリロナイトは減少せず、Ca型化率は徐々に減少した。

図 3.3.5-20は、1,000 日後の乾燥密度分布を試験分析結果とともに示した。モンモリロナ イトがほとんど溶解せず、乾燥密度もほとんど変化していない。一方、試験結果は、上流端 で乾燥密度が減少する傾向であった。これは、KPCa-N と同じく NaCl 溶液の通水による影 響と考えられ、同様に検討してく必要がある。



図 3.3.5-18 液相·固相分布結果図 (KPDS-HP2)







下流端

図 3.3.5-19 上流端および下流端の固相濃度経時変化(KPDS-HP2)



図 3.3.5-20 1,000 日後の乾燥密度分布 (KPDS-HP2)

(4) 力学挙動試験の化学的変質に関する地化学解析のまとめ

本検討では、Ca型化に伴う力学挙動試験では、乾燥密度の変動が顕著ではなかった。Ca型 化については、解析が試験より進行する結果となり、解析手法の課題が抽出された。

また、Na型ベントナイトの溶解に伴う力学挙動試験では、特に間隙水が NaOH であるケース(KPDS-HP1)において、通水側にむかって徐々に乾燥密度が減少しているような分布が、 計算結果でも再現することができた。

なお、別途行っている化学分析結果から、上流側でモンモリロナイト含有率が減少している 傾向が得られた。その原因については検討し、化学解析に適宜反映する必要がある。乾燥密度 を比較的再現しているケース(KPDS-HP1)において、解析結果を、モンモリロナイト含有率 とモンモリロナイト初期量で規格化したモンモリロナイト量について図 3.3.5・21に示す。モン モリロナイト含有量としては、下流側で減少した。また、モンモリロナイト量としては、上流 側で減少している。これについては、下流側にのみアナルサイムの沈殿があるために、モンモ リロナイト含有率としては減少することとなった。これは試験結果の傾向とは異なる結果であ る。考えられる要因としては、試験にくらべて解析では、二次鉱物の生成が早い、といえる。



図 3.3.5-21 1,000 日後のモンモリロナイト量分布 (KPDS-HP1)

また、本検討では、クニピアとして初期鉱物にモンモリロナイトのみを考えたが、実際の試料には初期鉱物としてモンモリロナイト以外に SiO₂ 成分等が存在している。これらの随伴鉱物を考慮すると更に実測に近い計算結果が得られる可能性がある。

3.3.6 長期性能評価のための化学・力学連成モデル試験のまとめ

本検討では、化学的な変質を伴う緩衝材の力学挙動に関して、前研究フェーズから、化学と力 学の連成モデル試験を実施して、ある力学・化学的平衡状態から別の平衡状態へ至る際の挙動を 調べている。具体的には、非常に精緻に力学試験を実施可能な超低ひずみ速度制御圧密試験機 (図 3.3.1-2)と非常に精緻に透水試験を実施可能なフローポンプ透水試験(図 3.3.1-3)を併用 した試験機を用いて化学・力学連成モデル実験を実施している。平成 26 年度に実施した力学挙 動試験のデータ取得、試験体の解体による化学変質挙動に関する分析、及び化学解析より得られ た成果を以下に示す。 Na 型ベントナイトの Ca 型化による力学挙動試験より、図 3.3.2-16に図 3.3.2-15に示した初 期応力からの増分値としての膨潤圧の経時変化の差から、Ca 型化、レラクゼーション、過剰間 隙水圧、イオン強度などが膨潤圧に及ぼす影響を定量評価した。これにより、Ca 型化における 応力の変化を補正出来ることを示した。Na 型ベントナイトのモンモリロナイトの溶解による力 学挙動試験より、本試験期間の 1,000 日程度では、高 pH がモンモリロナイトの膨潤圧に及ぼす 影響は小さい。乾燥密度 1.6Mg/m³で体積拘束した条件で NaOH 水溶液を通水した場合の膨潤圧 が経時的な漸減は、通水 800 日程度でほぼ終息し、この漸減に影響が考えられる、リラクゼーシ ョン挙動やイオン強度について確認した。間隙水のイオン強度 (pH13 の NaOH 水溶液、0.1mol/l) の影響は 1.0MPa 程度、間隙水の陰イオンの違いによる影響は 0.5MPa 程度であり、イオン強度 の違いにより 1.5MPa 程度の差が生じる。イオン強度の変化の力学挙動への影響は、0 から 0.1 は 0.5MPa 程度、0.1~1.0 は 1.5MPa と変化する。陰イオンが Na 型モンモリロナイトの圧密~ クリープ挙動に及ぼす影響は、モンモリロナイトが溶解するケースが、沈下量が有意に大きく、 沈下曲線の勾配が大きい。

Ca型化のケース及び溶解ケースのクリープ挙動の試験の試験体を解体し分析した。その結果、 Na型モンモリロナイトの Ca型化に関する試験(試料 No.2~No.5)では、Ca型化が、通水側から 10mm 程度まで進行していることを確認した。二次鉱物の生成は認められなかった。Na型モン モリロナイトの溶解に関する試験(試料 No.9 及び No.10)では、Naモンモリロナイトの溶解速度 は、-10E-11~-10E-12オーダであり、Ca型化の試験と比較しても変わらず、圧縮状態での溶 解速度は遅いことが確認された。二次鉱物の生成は、アナルサイムが想定されたが確認できなく、 NaClを通水した試料では、少量のアルカリ長石の生成の可能性があった。Ca型化及び溶解のい ずれの試験においても、通水側で乾燥密度の低下が認められた。力学挙動モデルは、今後これら の知見を反映し、信頼性を高めていく。また、化学変質解析についても、これらの知見を基に検 証し、力学解析との連成解析手法を検討していく。

力学挙動試験の化学的変質に関する地化学解析を実施し、分析結果と比較した。その結果、Ca 型化に伴う力学挙動試験については、解析結果が概ねの試験結果の傾向はあらわしているものの、 試験結果の乾燥密度の変動の再現やCa型化の経時的な進行など異なる点もあった。Na型に関す る力学試験は、NaOHを通水した試験結果の、通水側にむかって徐々に乾燥密度が減少している 分布が、解析結果で再現することができた。二次鉱物の生成については、試験では生成していな いアナルサイムが解析結果では生成した。再現が出来なかった点については、今後検討し解析へ の反映を行う必要性がある。なお、乾燥密度の変動の再現は、化学的な挙動の影響か否かも含め 検討する必要性がある。Naモンモリロナイトの溶解の力学試験についても、上記と同様に試験体 分析を実施し化学変質状態を確認し、力学モデル、化学解析に反映していく必要性がある。 3.4 緩衝材の連成解析モデルに関わる力学特性に関する試験のまとめ

人工バリアの長期挙動の評価のための HMC 連成解析手法の構築にあたり、緩衝材に関する化 学的変質を考慮した力学特性及び水理特性を体系的に説明できるモデルを構築することを目的と した検討を実施した。ベントナイトの化学的変質により二次鉱物が生成した場合の力学特性及び 水理特性への影響について検討を開始した。加えて、化学変質を伴う力学挙動の長期試験につい ても継続し、HMC 連成解析に資する検討を行った。

モンモリロナイトの溶解に伴うベントナイトの圧密挙動の変化は、こでまで完全飽和線(正規 圧密曲線)の移動で説明するモデルを構築してきた。モンモリロナイトの溶解に伴う二次鉱物の 生成するケースにも対応する様にモデルを拡張、提案した。アナルサイムへの変質影響に関する 排気一次元圧縮試験結果と拡張したモデルの完全飽和線は整合した。今後、その他の二次鉱物で の検証により、モデルの信頼性を向上させていく必要性がある。加えて、ベントナイトの膨潤線 と完全飽和線が、モンモリロナイト含有量が減少した場合に一致しなくなる点について、モンモ リロナイトの低含有量での不均一な分布の影響が懸念されたが、試験によれば均一な場合でも一 致しない。両者のズレは、モンモリロナイト含有率に対して線形ではなく、非線形であることが 予想される。緩衝材の力挙動のモデルの信頼性の向上のために、完全飽和線と膨張線のズレに関 する、モンモリロナイト含有率に対する非線形について、今後取り扱いを検討していく必要性が ある。

ベントナイトのせん断試験により限界状態線について検討した。限界状態線は、完全飽和線と 平行関係にあることがわかった。低密度側のデータを拡充し信頼性を向上させていく必要がある。

水理モデルとして Kozeny-Carman 則を発展させて、内間隙と外間隙を区別した Kozeny-Carman 則の適用性を検討した。その結果、内間隙のみで透水係数を定義するか、外間 隙と内間隙のそれぞれで定義した透水係数の調和平均を取ったモデルの整合性が高いことを示し た。

長期性能評価のための化学・力学連成モデル試験の継続及び試験体の解体、分析による化学的 挙動の確認、解析による検討を行った。Na型ベントナイトの Ca型化による力学挙動試験より、 初期応力からの増分値としての膨潤圧の経時変化の差から、Ca型化、レラクゼーション、過剰 間隙水圧、イオン強度などが膨潤圧に及ぼす影響を定量評価した。これにより、Ca型化におけ る応力の変化を補正出来ることを示した。

Na 型ベントナイトのモンモリロナイトの溶解による力学挙動試験より、本試験期間の 1,000 日程度では、高pHがモンモリロナイトの膨潤圧に及ぼす影響は小さい。一部の試験体を解体し、 化学変質の状態を分析により確認した。いずれの試験においても、通水側で乾燥密度の低下が認 められた。

Na型モンモリロナイトの Ca型化に関する試験では、Ca型化が、通水側から 10mm 程度まで 進行し、二次鉱物の生成は認められなかった。Na型モンモリロナイトの溶解に関する試験では、 Na モンモリロナイトの溶解速度は、-10E-11~-10E-12 オーダであり、Ca型化の試験と比較 しても変わらず、圧縮状態での溶解速度は遅いことが確認され、少量のアルカリ長石の生成の可 能性があった。

解体した試料の地化学解析において、Ca型化に伴う力学挙動試験については、解析結果が概ね

の試験結果の傾向はあらわしているものの、試験結果の乾燥密度の変動の再現や Ca 型化の経時 的な進行など異なる点もあった。

Na 型に関する力学試験は、NaOH を通水した試験結果の、通水側にむかって徐々に乾燥密度 が減少している分布が、解析結果で再現することができた。二次鉱物の生成については、試験で は生成していないアナルサイムが解析結果では生成した。再現が出来なかった点については、今 後検討し解析への反映を行う必要性がある。なお、乾燥密度の変動の再現は、化学的な挙動の影 響か否かも含め検討する必要性がある。

試験継続中の Na モンモリロナイトの溶解の力学試験についても、上記と同様に試験体分析を 実施し化学変質状態を確認し、力学モデル、化学解析に反映していく必要性がある。力学挙動モ デルは、今後これらの知見を反映し、信頼性を高めていく。また、化学変質解析についても、こ れらの知見を基に検証し、力学解析との連成解析手法を検討していく必要がある。 3章の参考文献

- [1] 小林一三,戸井田克,笹倉剛,太田秀樹:等含水比線と等飽和度線を用いた締固めベントナイトの圧縮・膨潤挙動の解釈,土木学会論文集 C, Vol. 63, No.4, pp.1065-1078 (2007).
- [2] 伊藤雅和,岡本真由美,鈴木啓三,他:ベントナイトの鉱物組成分析,原子力誌,36[11],1055 (1994).
- [3] Andrew Schofield and Peter Wroth: Critical State Soil Mechanics, McGraw-Hill (1968).
- [4] 笹倉剛, 畔柳幹雄, 小林一三, 岡本道孝: ベントナイト変遷挙動のモデル化のためのデータ 取得 II, JNC TJ8400 2003-048 (2003).
- [5](財)原子力環境整備促進・資金管理センター:平成20年度地層処分技術調査等委託費TRU 廃棄物処分技術人工バリア長期性能評価技術開発報告書(第1分冊)-人工バリアの長期挙 動の評価-(2009)
- [6] 冨田武満、田辺和康、山本克己:マッフル炉を用いた強熱減量法による粘土鉱物量の定量、 土木学会論文集、No.455/III-18, pp.55-63 (1992)
- [7] Satoh & : "Dissolution of compacted montmorillonite at hyperalkaline pH and 70 °C: in-situ VSI and ex-situ AFM measurements", Clay Minerals(2013)
- [8] Parkhurst, D.L. and Appelo, C.A.J. : User's guide to PHREEQC (version 2)—A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations, U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99-4259 (1999)
- [9] Randolph C. Arthur et al. : Development of Thermodynamic Databases for Hyperalkalone, Argillaceous Systems. JNC, TN8400 2005-010 (2005)
- [10] 電気事業連合会 核燃料サイクル開発機構:TRU 廃棄物処分技術検討書 -第2次TRU 廃棄 物処分研究開発とりまとめ-(2005)